

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EDUARDO ANDREUS MEGLIN STEIN

**VARIABILIDADE DE CLOROFILA *a* NAS ÁGUAS DO COMPLEXO ESTUARINO
DE PARANAGUÁ E PLATAFORMA ADJACENTE: UMA AVALIAÇÃO DOS
ALGORITMOS E CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS DO SENSOR MODIS.**

PONTAL DO PARANÁ

2010

EDUARDO ANDREUS MEGLIN STEIN

**VARIABILIDADE DE CLOROFILA *a* NAS ÁGUAS DO COMPLEXO ESTUARINO
DE PARANAGUÁ E PLATAFORMA ADJACENTE: UMA AVALIAÇÃO DOS
ALGORITMOS E CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS DO SENSOR MODIS.**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Oceanografia com habilitação em Pesquisa Oceanográfica do Curso de Graduação em Oceanografia, Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Mauricio Almeida Noernberg.

PONTAL DO PARANÁ

2010

Dedico este trabalho aos meus pais e a minha namorada Larissa, por todo o apoio nestes anos de curso!

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, por tanto amor e apoio a mim dedicados, pela brava luta para que este sonho se realizasse. Sem vocês nada disso valeria à pena. Amo vocês!

Ao meu irmão, pela bela família que conquistou, a minha cunhada, por ter gerado a minha linda sobrinha, que arranca sorrisos de todos por onde passa.

Ao meu orientador professor Mauricio A. Noernberg, pelas oportunidades, auxílio, orientação, paciência e amizade. Ainda vamos nos orgulhar do nosso time!

A minha namorada Larissa, que esteve ao meu lado durante todos esses anos, sendo a minha base emocional, a minha melhor amiga e conselheira. Com quem passei os melhores momentos de minha vida e a quem dedico todo o meu amor!

Aos grandes e inesquecíveis amigos, especialmente o Denis, Fabricio e Rafael Bet, pelas tantas horas desperdiçadas com as mais incríveis bobagens do mundo. Através de nossos projetos e idéias ainda vamos ficar bilionários!!!!

A todos os velhos amigos, em especial o Maiko, Eber, Leonardo e Andressa, além de todos os demais amigos conquistados nesta vida acadêmica, como a Thais, Andréia, Tuan, Mineiro, Daniel, Rodolfo, Glauco, Fernanda e Noele, vocês fizeram com que estes anos passassem voando!

Aos colegas do Grupo de Física Marinha, pela companhia em tantas horas dentro do laboratório. A Carol pela simpatia e gentileza de confeccionar os mapas aqui utilizados. Além daqueles que tanto ajudaram nas coletas de campo, como a Raissa, Noele, Elaine, Thaís, Vanessa e ao Bruno Martini, pela companhia em laboratório, sempre regada pelas mais sérias conversas sobre as lacunas da ciência e sobre futuras publicações nas mais prestigiadas revistas de divulgação científica.

A todos os professores e funcionário do Centro de Estudos do Mar.

RESUMO

O sensoriamento remoto da cor do mar sobre regiões estuarinas e costeiras por muitas vezes gera informações imprecisas, devido ao aumento de constituintes opticamente ativos na água, e do enriquecimento de aerossóis atmosféricos de origem continental. Assim, para a estimativa da concentração de clorofila, foi necessária a verificação e qualificação dos melhores algoritmos e das correções atmosféricas do sensor MODIS, comparando-os com dados adquiridos *in situ*. Após esta qualificação, o melhor algoritmo e modelo de correção foi aplicado para um acompanhamento anual da concentração de clorofila do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) e plataforma adjacente. Foi utilizado o algoritmo global do MODIS - OC3M, que apresenta três variações em sua fórmula, as quais são denominadas de Chlor_a, Chlor_oc2 e Chlor_oc3, e também o algoritmo semi-analítico GSM. Os modelos de correção atmosféricas correspondem ao Padrão do sensor MODIS e a correção de MUMM. A comparação entre os dados ocorreu através da correlação de Pearson, análise de dispersão e pelo erro médio quadrático (EMQ). Para a primeira comparação, os dados apresentaram correlação negativa não significativa, devido ao intervalo de aquisição entre o levantamento de campo e a passagem do sensor, o qual implicou em medidas sobre diferentes períodos de maré. Para as duas últimas coletas, os valores de clorofila foram correlatos para ambas as correções atmosféricas. Através do EMQ foi possível determinar que o algoritmo que respondeu de maneira mais fiel aos dados de campo foi o Chlor_oc2, quando processado com o modelo de correção atmosférica de MUMM, sempre com valores mais baixos do que os demais produtos. Este algoritmo, juntamente com o modelo de MUMM, foi aplicado para o acompanhamento da variabilidade anual de clorofila. Foram utilizados dados de 28 imagens, que representaram o período de junho de 2009 a julho de 2010, e então foi estimada a concentração média de clorofila no setor interno e externo do CEP. Esses dados foram relacionados às taxas de precipitação diária, para o mesmo período, obtidos a partir da estação meteorológica localizada em Pontal do Sul. A concentração de clorofila para o setor interno do CEP apresentou correlação com os de precipitação. A variabilidade anual de clorofila respondeu de maneira semelhante a padrões determinados por valores pretéritos adquiridos *in situ*. Desta forma, o algoritmo Chlor_oc2, processado com a correção atmosférica de MUMM se mostrou eficaz e hábil para estimar a concentração de clorofila na região do CEP.

Palavra-chave: Correção atmosférica Padrão. Modelo de MUMM. Algoritmo global OC3M. Algoritmo semi-analítico GSM.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: MAPA DO CEP E DA PLATAFORMA ADJACENTE E LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DOS DADOS AMOSTRADOS.....	11
FIGURA 2: MAPA DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA (MG/M ³), OBTIDO NAS 4 SAÍDAS DE CAMPO, SOBRE OS PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	22
FIGURA 3: IMAGENS MODIS DO DIA 6 DE MAIO CORRESPONDENTE AOS ALGORITMOS QUE ESTIMAM A CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A UTILIZANDO A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	25
FIGURA 4: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_A E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	26
FIGURA 5: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC2 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	26
FIGURA 6: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC3 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	27
FIGURA 7: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_GSM E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	27
FIGURA 8: IMAGENS MODIS DO DIA 6 DE MAIO CORRESPONDENTE AOS ALGORITMOS QUE ESTIMAM A CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A UTILIZANDO A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	29
FIGURA 9: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_A E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	30
FIGURA 10: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC2 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	30
FIGURA 11: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC3 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	31

FIGURA 12: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_GSM E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	31
FIGURA 13: VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA NOS PONTOS AMOSTRAIS ENTRE OS DADOS ADQUIRIDOS <i>IN SITU</i> E PELOS ALGORITMOS, COM DUAS CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS DISTINTAS. M – CORRESPONDE A CORREÇÃO DE MUMM; P – CORRESPONDE A CORREÇÃO PADRÃO.	33
FIGURA 14: IMAGENS MODIS DO DIA 7 DE JUNHO CORRESPONDENTE AOS ALGORITMOS QUE ESTIMAM A CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A UTILIZANDO A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	35
FIGURA 15: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_A E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	36
FIGURA 16: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC2 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	36
FIGURA 17: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC3 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	37
FIGURA 18: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_GSM E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	37
FIGURA 19: IMAGENS MODIS DO DIA 7 DE JUNHO CORRESPONDENTE AOS ALGORITMOS QUE ESTIMAM A CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A UTILIZANDO A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	38
FIGURA 20: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_A E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	39
FIGURA 21: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC2 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	40
FIGURA 22: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC3 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	40

FIGURA 23: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_GSM E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	41
FIGURA 24: VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA NOS PONTOS AMOSTRAIS ENTRE OS DADOS ADQUIRIDOS <i>IN SITU</i> E PELOS ALGORITMOS, COM DUAS CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS DISTINTAS. M – CORRESPONDE A CORREÇÃO DE MUMM; P – CORRESPONDE A CORREÇÃO PADRÃO.	43
FIGURA 25: IMAGENS MODIS DO DIA 5 DE JULHO CORRESPONDENTE AOS ALGORITMOS QUE ESTIMAM A CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A UTILIZANDO A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	45
FIGURA 26: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_A E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	46
FIGURA 27: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC2 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	46
FIGURA 28: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC3 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	47
FIGURA 29: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_GSM E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO.	48
FIGURA 30: IMAGENS MODIS DO DIA 5 DE JULHO CORRESPONDENTE AOS ALGORITMOS QUE ESTIMAM A CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A UTILIZANDO A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	49
FIGURA 31: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_A E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	50
FIGURA 32: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC2 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	50
FIGURA 33: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_OC3 E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	51

FIGURA 35: DISPERSÃO DOS VALORES DE CLOROFILA DOS DADOS DE CAMPO E DO ALGORITMO CHLOR_GSM E PARA A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE MUMM.	51
FIGURA 36: VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA NOS PONTOS AMOSTRAIS ENTRE OS DADOS <i>IN SITU</i> E DOS ALGORITMOS COM DUAS CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS DISTINTAS. M – CORRESPONDE A CORREÇÃO DE MUMM; P – CORRESPONDE A CORREÇÃO PADRÃO.....	53
FIGURA 37: CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA PARA CADA PONTO DAS IMAGENS PROCESSADAS, CONTENDO AS DATAS DAS IMAGENS, MARÉ (SZ – SIZÍGIA; QT – QUADRATURA) E PERÍODO (E – ENCHENTE; V – VAZANTE).....	56
FIGURA 38: MÉDIA DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA, EXTRAÍDA A PARTIR DAS IMAGENS DO SENSOR MODIS, PARA A REGIÃO INTERNA E EXTERNA DO CEP SOBRE A PRECIPITAÇÃO TOTAL DIÁRIA.	57
FIGURA 39: DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES MÉDIAS DE CLOROFILA DAS PORÇÕES INTERNAS E EXTERNAS DO CEP PARA OS DADOS DAS IMAGENS DO SENSOR MODIS.	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ABORDAGEM GERAL.....	1
1.2 SENSORIAMENTO REMOTO DA COR DO MAR.....	4
1.3 SENSOR MODIS, A BORDO DO SATÉLITE AQUA	6
1.4 OBJETIVO GERAL	9
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	10
2.1 ÁREA DE ESTUDO	10
2.2 DADOS AMOSTRADOS IN SITU	13
2.3 TRATAMENTO DOS DADOS MEDIDOS IN SITU.....	14
2.4 DADOS DO SENSOR MODIS	14
2.5 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS	15
2.6 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA	16
2.7 ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA <i>a</i> PELOS ALGORITMOS DO SENSOR MODIS.....	17
2.8 ACOMPANHAMENTO DA VARIABILIDADE ANUAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA <i>a</i>	19
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.1 DADOS DE CAMPO	20
3.2 ALGORITMOS DO SENSOR MODIS COMPARADOS AOS DADOS DE CAMPO E AS DISTINTAS CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS.....	23
3.2.1 Campanha do dia 04/05/2010.....	24
3.2.2 Campanha do dia 08/06/2010.....	34
3.2.3 Campanha do dia 06/07/2010.....	44
4 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 ABORDAGEM GERAL

As regiões costeiras e estuarinas representam apenas cerca de 7% das águas marinhas em todo o mundo. No entanto, estas regiões têm importância singular em relação à produtividade biológica, pois representam a zona de transição entre o continente e oceano, além de sua importância para as atividades humanas relacionadas à pesca, recreação, exploração mineralógica, operações militares, dentre outras (SCHALLES, 2006).

A biomassa fitoplanctônica é uma importante característica biofísica comumente utilizada para avaliar o nível de eutrofização das massas de água, além de estudos envolvendo o ciclo do carbono no planeta (DARECKI & STRAMSKI, 2004). O pigmento fotossintético clorofila *a* é o indicador chave da biomassa fitoplanctônica, estando presente em algas eucarióticas e nas cianobactérias, sendo dominante na absorção de luz (SCHALLES, 2006). Assim, a estimativa da concentração de clorofila *a* é parte integrante do monitoramento da qualidade da água (MOSES *et al*, 2009).

A clorofila *a* e os níveis de produção fitoplanctônicos envolvem complexos fenômenos e interações de características químicas, físicas e processos biológicos. A concentração deste pigmento é controlada por determinadas variáveis, como a disponibilidade de luz, nutrientes, tempo de residência e estrutura da coluna da água, temperatura e pressão de pastagem interespecífica (SCHALLES, 2006; CARVALHO, 2009; MOSES *et al*, 2009). As zonas costeiras e estuarinas costumam apresentar maiores concentrações de clorofila do que as áreas *offshore*, no entanto os processos de dispersão de plumas e a ressurgência podem aumentar a distribuição de nutrientes e com isso elevar a heterogeneidade espacial. As regiões estuarinas têm complexos padrões espaciais e temporais com relação aos constituintes biogeoquímicos, que ainda são relacionados à forçantes como a energia eólica e das marés, aporte fluvial e distúrbios antropogênicos, gerando a mistura dos gradientes (SCHALLES, 2006). Devido a essa quantidade de variáveis dos padrões espaciais e a elevada dinâmica encontrada nestes ambientes, torna-se

difícil e complexo a escolha ideal de uma malha amostral para um estudo detalhado destes ambientes.

A concentração de clorofila é classicamente mensurada através da aquisição de amostras *in situ* e extração de seus valores em laboratório. Mas os pigmentos fotoativos, como a clorofila *a*, causam mudanças na cor da água através da absorção e espalhamento da luz incidente na água. Desta maneira a sua concentração pode ser estimada a partir de dados de reflectância espectral de sensoriamento remoto, relacionando mudanças ópticas observadas na luz refletida nos comprimentos de onda específicos à concentração de clorofila *a* (MOSES *et al*, 2009). A estimativa da concentração de clorofila é uma das aplicações cientificamente mais relevantes e utilizadas do sensoriamento remoto para os sistemas aquáticos, reconhecido como sensoriamento remoto da cor do oceano, mas a facilidade de tal procedimento depende das características ópticas dos corpos da água.

A água representa uma mistura de diversas propriedades, que apresentam distinções ópticas, interagindo com a luz de maneira diferente. Assim a cor da água se torna uma fonte útil de informação sobre essas propriedades. Devido a isto, a água é distinta em 2 tipos: águas do caso 1 e caso 2. Esta terminologia e classificação foram estabelecidas por MOREL & PRIEUR (1977), para qual o sinal óptico das águas do caso 1 é dominado pelas células fitoplanctônicas vivas, detritos e partículas mortas do fitoplâncton ou das atividades relacionadas à sua digestão e pela matéria orgânica dissolvida gerada por ele próprio (GORDON & MOREL, 1983). As águas do caso 2 contêm, além dos constituintes presentes nas de caso 1, constituintes ópticos introduzidos na coluna d'água, que incluem a ressuspensão de partículas em águas rasas, descargas orgânicas e inorgânicas proveniente do aporte de rios ou transportadas pelos ventos, matéria orgânica dissolvida colorida ou substâncias amarelas oriundas de fontes terrígenas e litorâneas e material antropogênico (GORDON & MOREL, 1983; KAMPEL *et al*, 2005; KOMICK, 2009; MOSES *et al*, 2009). As ocorrências das águas do caso 1 normalmente prevalecem na região oceânica e *offshore*, mas também podem ocorrer em áreas costeiras oligotróficas, durante épocas de estiagem, ou em locais onde ocorra intrusão de águas oceânicas. As águas do caso 2 ocorrem normalmente nas zonas costeiras, dependendo das dinâmicas físicas, do aporte e da dispersão de plumas de estuários e rios e dos padrões sazonais vigentes em cada região (SCHALLES, 2006).

Os algoritmos de clorofila para as águas do caso 1 são universalmente baseados na interação da densidade do fitoplâncton com a água. Assim, com o aumento da densidade celular, a absorção de clorofila domina os comprimentos de onda azul e causam decréscimo de reflectância, que é a razão entre o fluxo refletido e o incidente numa superfície (NOVO, 1992), enquanto a dispersão das células domina os comprimentos de onda do verde e causam aumento na reflectância (DARECKI & STRAMSKI, 2004; KAMPEL *et al*, 2005; SCHALLES, 2006). A simples razão da faixa azul do espectro eletromagnético pela verde apresenta uma robusta e sensível relação das concentrações de clorofila para águas oceânicas. Para as águas do caso 2 essa relação torna-se menos sensível devido à presença dos demais constituintes que interferem no sinal óptico. A complexidade óptica das águas costeiras, especificamente a absorção e o espalhamento não correlacionado pelas substâncias amarelas e pelas partículas em suspensão na região azul do espectro, torna as relações do azul e verde imprecisas para estimar a concentração de clorofila *a* (DARECKI & STRAMSKI, 2004; MOSES *et al*, 2009).

Além das complexidades ópticas, outra variável importante refere-se à interferência e intervenção da atmosfera pelos aerossóis. A radiância emergente da superfície do mar (energia medida pelos sensores a bordo do satélite) é pequena quando comparada à parcela derivada dos efeitos atmosféricos, também coletada pelos sensores. A atmosfera chega a contribuir com mais de 90% da radiância coletada pelos sensores, e desta forma, antes de se estimar qualquer parâmetro se faz necessária uma correção atmosférica acurada, onde se retira da radiância coletada pelo sensor toda a parcela originada pela atmosfera (GORDON & WANG, 1994; MENEZES, 1999).

Após a remoção dos efeitos atmosféricos, a resultante seria a real radiância que deixa a superfície do mar que é utilizada para estimar a concentração dos pigmentos. Em geral, estes algoritmos têm como base análises de regressão entre medidas remotas e *in situ*, modelos de classificação bio-ópticos, ou diversas combinações entre os dois métodos (GORDON & WANG, 1994; MENEZES, 1999). Assim como os algoritmos da cor do oceano, os métodos clássicos de correção atmosférica são menos eficientes para as regiões costeiras, devido à presença de constituintes de origem continental, o que modifica a resposta da radiação eletromagnética de acordo com os aerossóis.

Ao longo das últimas décadas diversas pesquisas têm sido desenvolvidas a respeito da calibração, validação e desenvolvimento de algoritmos e correções atmosféricas para as regiões de águas do caso 2. A maioria dos estudos se baseia em dados amostrados *in situ*, que posteriormente são comparados aos dados gerados pelos algoritmos estabelecidos nos sensores remotos.

1.2 SENSORIAMENTO REMOTO DA COR DO MAR

Sensoriamento remoto é uma técnica utilizada para coletar dados sem o contato físico com a superfície de estudo. Em uma abordagem mais ampla, NOVO (1992) define sensoriamento remoto como sendo a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, etc., com o objetivo de estudar o ambiente através do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra em suas mais diversas manifestações. Sensores são utilizados para mensurar a energia refletida e emitida da superfície terrestre, e as informações podem ser exibidas através de imagens digitais.

A coleta de dados por sensores remotos apresenta algumas desvantagens relacionadas à presença de nuvens e ao ângulo de visada do sensor, que por muitas vezes impossibilitam a aquisição de uma sequência diária de imagens. Entre as vantagens pode-se citar a visão sinótica bidimensional, a alta resolução espacial e temporal dos dados e a capacidade de se construir séries de tempo de dados com consistência espacial e por longos períodos de tempo (ROBINSON, 1985; JOINT *et al*, 2000; BAILEY *et al*, 2006). Devido a estas vantagens, os estudos sobre os oceanos passaram a utilizar esta técnica de aquisição de dados para entendimento tanto de eventos de larga escala espacial como também a eventos relacionados a regiões costeiras e estuarinas.

Uma das principais e mais crescentes aplicabilidades do uso de sensores remotos está relacionado ao conceito de “cor do mar”, que se refere à assinatura espectral da água na faixa do visível, que depende das propriedades ópticas da água do mar (SOUZA, 2003). Este conceito está associado à radiação emergente do oceano na faixa espectral do visível (0.4- 0.7 μm), tendo como objetivo obter informações quantitativas sobre os tipos e concentrações de substâncias presentes

em um corpo d'água, com base em variações na forma espectral e na intensidade do sinal remoto. (KAMPEL *et al*, 2005).

Apesar das vantagens, os dados remotos não substituem amostragens *in situ*. A principal limitação está ligada a possibilidade de se inferir apenas parâmetros na superfície, e não em um perfil na coluna d'água (MENEZES, 1999). Assim, é consenso que para estimar a concentração de clorofila e demais produtos fornecidos pelos sensores de forma acurada o ideal é integrar, através do desenvolvimento de algoritmos, dados de coletas *in situ* e de satélites, aproveitando as vantagens dos dois métodos (ROBINSON, 1985).

Através de observações pioneiras realizadas a partir da década de 60, foi demonstrado o potencial da utilização de sensores remotos no monitoramento dos pigmentos fotossintéticos e impulsionaram a NASA (National Aeronautics and Space Administration) a desenvolver tecnologia orbital para monitorar a *cor do oceano* (MENEZES, 1999).

O primeiro sensor orbital especificamente desenvolvido com a finalidade de monitorar a *cor do oceano* foi o CZCS, lançado em 1978, pela NASA a bordo do satélite meteorológico NIMBUS-7 (MENEZES, 1999; SOUZA, 2003). A partir de então, muitos esforços foram realizados para o desenvolvimento de sensores com melhor desempenho espectral e radiométrico, melhor cobertura espacial e temporal e qualidade nos produtos (MOREL, 1998). Apesar da importância das imagens da *cor do oceano*, somente em 1996 foi lançado o segundo sensor com esta finalidade: *Ocean Color and Temperature Scanner* (OCTS), colocado em órbita pela agência espacial japonesa, *National Space Agency of Japan* (NASDA), em agosto de 1996, a bordo do satélite *Advanced Earth Observing Satellite* (ADEOS). Devido a problemas no painel solar da espaçonave, o satélite deixou de operar em junho de 1997, apenas sete meses após ter sido lançado (MENEZES, 1999).

Em agosto de 1997, após quase uma década sem imagens da *cor do mar*, a NASA finalmente colocou em órbita o sucessor do CZCS, o sensor *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS), lançado a bordo do satélite OrbView-2. Posteriormente, o sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers (MODIS), foi lançado nos satélites do projeto da NASA Earth Observing System (EOS) Terra e Aqua, em dezembro de 1999 e maio de 2002, respectivamente (DARECKI & STRAMSKI, 2004).

1.3 SENSOR MODIS, A BORDO DO SATÉLITE AQUA

A NASA criou o sistema de observação da Terra (EOS - *Earth Observing System*), marcando o recente desenvolvimento da ciência e tecnologia de sensoriamento remoto, com a concepção de plataformas orbitais com vários sensores a bordo para coletarem diferentes tipos de dados (SOARES, *et al*, 2007). Como o objetivo do programa EOS é permitir a observação continuada das mudanças globais, as plataformas e os sensores foram desenvolvidos para operar por um longo período de tempo capaz de incorporar alguns fenômenos naturais. O programa EOS trouxe como novidade o fato de que pela primeira vez, em um programa espacial, os sensores foram definidos a partir dos requisitos de cientistas das áreas da Ciência da Terra, que tiveram a missão de avançar no entendimento dos processos de mudanças globais (SOARES, *et al*, 2007).

Tais esforços levaram ao lançamento do sensor MODIS, nas plataformas Terra e Aqua, encontrando-se em órbita quase polar (98°) sincronizada com o Sol, a 705 km de altura e a largura da área observada é de 2.330 km (NASA, 2002 A). A missão deste sensor é a parte central do programa EOS, com o objetivo de subsidiar a coleta de informações sobre o ciclo da água na Terra, inclusive a evaporação dos oceanos, vapor da água na atmosfera, nuvens, precipitação, umidade, gelo e cobertura de neve. Outros parâmetros que também podem ser medidos pelo Aqua incluem fluxos de energia radiativa, aerossóis, cobertura vegetal, fitoplâncton, matéria orgânica dissolvida nos oceanos, e temperatura do ar e água (SOARES, *et al*, 2007). O fato de o sensor MODIS estar a bordo das duas plataformas realça a importância singular que ele tem dentro dos instrumentos do EOS para estudos dos processos de mudanças globais. É o instrumento responsável pela radiometria da cor do mar, e segundo BARNES *et al.* (2003), tais estudos devem ser realizados com os dados do satélite Aqua, visto que o Terra apresenta instabilidades nas bandas de menor comprimento de onda, comprometendo a geração de alguns produtos, e por isto esse foi o utilizado neste trabalho.

O MODIS realiza observações de toda a superfície terrestre a cada 1 ou 2 dias, e adquire dados em 36 bandas espectrais que se situam na faixa do visível, infravermelho próximo e médio, entre 0.4 e 14.4 μm e se distribuem em diferentes grupos de resolução espacial. O tamanho do pixel varia de 250, 500 m e 1000 km para as distintas bandas e a quantidade de pixels na imagem varia em conformidade

com as bandas. Esta capacidade de resolução o coloca como a fonte mais detalhada de informação espacial dentre todos os instrumentos do Aqua (NASA, 2002 A).

O algoritmo global atual para estimar a concentração de clorofila *a* utilizado pelo sensor MODIS é o OC3M, possuindo algumas variações em sua composição relacionadas às razões dos comprimentos de ondas utilizados em sua equação (O'REILLY *et al.*, 2000). Também existem algoritmos específicos criados sobre diferentes regiões para estimativas em águas do caso 2, como o produto GSM (MARITORENA *et al.*, 2002).

Diversos estudos têm utilizado diferentes algoritmos de clorofila e distintas correções atmosféricas do MODIS para comparação com dados amostrados *in situ*. DARECKI & STRAMSKI (2004) realizaram uma avaliação dos algoritmos bio-ópticos no mar Báltico, compreendendo águas do caso 2. Comparando dados de campo históricos com os algoritmos globais do sensor SeaWiFS e MODIS, notaram uma redução de erros utilizando as variações dos modelos globais, e também verificaram a necessidade de novas avaliações com maior sincronismo entre os dados de campo e do sensor.

Em um levantamento geral sobre os produtos e correções atmosféricas disponíveis para o sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua, SAVTCHENKO *et al.* (2004), MÉLIN *et al.* (2007) e XIONG *et al.* (2009) constataram que este é o sistema mais avançado da NASA Earth Observing System (EOS) em operação, fornecendo muitos dados para a comunidade científica. Fato este decorrente das calibrações que são efetuadas no sensor em órbita. No entanto, CHANG & GOULD (2006) identificaram incertezas quando compararam medidas das propriedades ópticas com dados de campo e do sensor para as regiões costeiras. Atribuíram as discrepâncias encontradas nos valores de reflectância de sensoriamento remoto à correção atmosférica e as variações da superfície do mar. Ainda comparando dados de campo com os do satélite, GITELSON *et al.* (2008) obtiveram valores de validação satisfatórios com relação ao uso de diferentes modelos, envolvendo a reflectância de sensoriamento remoto, para a estimativa da concentração de clorofila em águas do caso 2.

Utilizando a interpolação das bandas do MODIS, LADNER *et al.* (2007) avaliaram o desenvolvimento de uma menor resolução espacial sobre as propriedades ópticas. Verificando a necessidade de mais dados *in situ* para que a

validação da resolução e dos algoritmos fosse mais precisa. Já MOSES *et al.* (2009) discutiram sobre novas maneiras de estimar a concentração de clorofila *a* para as águas costeiras russas, obtendo dados consistentes, mas pouco conclusivos, a respeito de mudanças nos comprimentos de bandas da reflectância de sensoriamento remoto para uma maior acurácia a respeito dos valores de clorofila.

Utilizando dados do sensor MODIS, para realizar uma estimativa da concentração de clorofila *a* na plataforma continental adjacente à Baixada Santista, CARVALHO (2009) comparou um algoritmo regional a algoritmos do sensor, obtendo sucesso com o modelo regional, quando comparado a dados *in situ*. Com isso pôde fazer uma caracterização da região, que apresenta altas variabilidades sazonais e pouca biomassa fitoplanctônica. Com o uso de algoritmos semi-analíticos, OLIVEIRA (2009) observou as mudanças da pluma costeira da foz do Rio São Francisco, ocasionadas pelas construções de diversas barragens no leito deste rio. Identificou a exportação de material dissolvido e particulado do continente para a plataforma, caracterizando sazonalmente a intensidade do transporte de cada constituinte óptico.

No Complexo Estuarino de Paranaguá e plataforma adjacente, área de estudo deste trabalho, FREITAS & NOERNBERG (2007) utilizaram as imagens MODIS para realizar uma análise dos fatores limitantes a utilização dos dados do mesmo, e validaram o uso desse artifício para diversos estudos, como a variabilidade da pluma costeira e da temperatura da superfície do mar, respectivamente. Constataram também os fatores que inviabilizam o uso desse mecanismo. Em 2008, ANGELOTTI utilizou imagens do sensor MODIS através do produto radiância normalizada da água centrada no comprimento de onda de 555 nm (nL_w_{555}), obtendo sucesso ao correlacionar dados de campo com dados do sensor para a descrição da dispersão da pluma estuarina do CEP. Utilizou também com sucesso as imagens MODIS para obter dados temporais referentes aos dias em que não foram efetuadas coletas de campo.

1.4 OBJETIVO GERAL

Avaliar a qualidade dos dados do sensor MODIS para aquisição da concentração de clorofila *a* sobre a região do Complexo Estuarino de Paranaguá e plataforma adjacente.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar e qualificar o melhor algoritmo para estimativa da concentração de clorofila *a*;
- Avaliar o modelo de correção atmosférica mais adequado para ser utilizado sobre a área de estudo;
- Aplicar o melhor algoritmo e modelo atmosférico para um acompanhamento anual da concentração de clorofila.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O litoral do estado do Paraná destaca-se pela presença de dois estuários bem desenvolvidos, a Baía de Guaratuba, localizada na porção sul do litoral, com aproximadamente 50 km² de área superficial líquida e o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), com área superficial de 551.8 km² (NOERNBERG *et al*, 2006). Os dois estuários são caracterizados geomorfologicamente como estuários de planície costeira, com deltas de maré em suas desembocaduras (ANGULO, 1992).

O clima na região litorânea paranaense é segundo a classificação de Köppen, do tipo Cfa - temperado e com verões quentes, acima dos 22°C, com precipitação regular todos os meses do ano, com concentração de chuvas nos meses de verão, contudo sem estação de seca definida (IPARDES, 1991).

O CEP (Figura 1) está situado na porção centro-norte do litoral paranaense, entre 25°16' e 25°34' S e 48°17' e 48°42' W, possui dois eixos principais e uma complexa geometria: o eixo Leste-Oeste (L-O), representado pelas baías de Paranaguá e Antonina, e o eixo Sul- Norte (S-N), representado pelas baías das Laranjeiras, Guaraqueçaba e Pinheiros, conectadas por diversos canais de maré. O CEP apresenta duas desembocaduras com deltas de maré formados na plataforma continental rasa (< 20 m de profundidade), denominadas de Norte e Sul de acordo com sua posição geográfica em relação à Ilha do Mel. A desembocadura Norte é composta por dois canais, o Norte e o Sueste, localizados a Norte e ao Sul da Ilha das Palmas, respectivamente. A desembocadura Sul apresenta o canal da Galheta. Os três canais serviram como via navegável para o interior do CEP, de forma que passaram por diversas dragagens, mas hoje o canal da Galheta é a via de acesso a navegação.

O CEP apresenta grande diversidade de ambientes, incluindo planícies de maré, baixios, ilhas, costões rochosos, marismas, além de ser circundado por extensos manguezais que funcionam como a principal fonte de detritos para o sistema estuarino, com suas gamboas (rios de maré) concentrando consideravelmente o aporte de água doce, além dos rios propriamente ditos (LANA, 1986).

A circulação é regida basicamente por três fatores: a descarga de água doce, as correntes de maré e a tensão do vento (MARONE *et al.*, 1994). O principal mecanismo de fornecimento de energia está relacionado às correntes de maré, ocorrendo diariamente dois ciclos, e seu padrão é semi-diurno, com desigualdades diurnas, com amplitude média de 1,4 m (maré de quadratura) e 1,7 m (maré de sizígia), sofrendo influências sazonais do aporte fluvial, sendo a maré vazante a mais intensa e predominante nas duas desembocaduras (MARONE *et al.*, 1997).

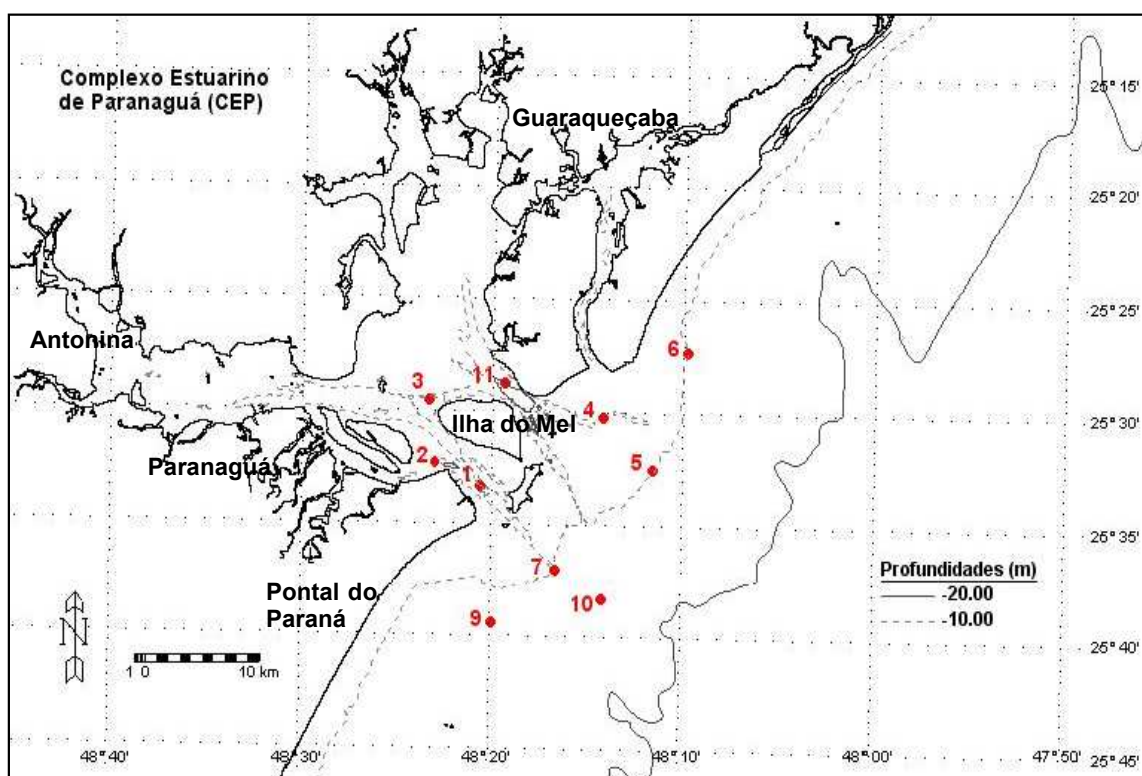


Figura 1: Mapa do CEP e da plataforma adjacente e localização dos pontos de coleta dos dados amostrados. Setor Interno – pontos 1, 2, 3, 4 e 11; Plataforma Adjacente – pontos 5, 6, 7, 9 e 10.

Fonte: UFPR/LOGC (2010).

Outro mecanismo de fornecimento de energia do Complexo Estuarino de Paranaguá está relacionado à descarga fluvial. Segundo MANTOVANELLI (1999), o CEP recebe a drenagem de aproximadamente 70% da área da bacia hidrográfica litorânea do Estado do Paraná. Sendo que as bacias de Antonina e Paranaguá correspondem a mais da metade da drenagem do CEP, sofrendo, desta forma, uma maior influência do aporte de água doce continental. As bacias hidrográficas de Antonina e Paranaguá apresentam deficiência hídrica no inverno, visto que neste

período a evaporação é, em média, sete vezes superior à precipitação (MANTOVANELLI, 1999). No verão ocorre excedente hídrico, intensificando o aporte de água doce no estuário. O potencial erosivo causado pela chuva é oito vezes superior ao do inverno (MANTOVANELLI, *et al.* 2004). A variação na concentração de nutrientes e clorofila *a*, assim como o padrão de distribuição na coluna da água estão associados ao regime de chuvas (REBELLO *et al.*, 1990).

Os processos de estratificação halina e mistura vertical são extremamente dinâmicos, sendo alterado tanto em escalas horárias, relativas ao ciclo de maré, quanto entre os ciclos de sizígia e quadratura, em função da variação na intensidade das correntes de maré (MARONE *et al.*, 1997). Esse gradiente horizontal de salinidade varia de 0, na sua porção mais a montante e próxima às desembocaduras de rios, até 34,5, em regiões externas (BRANDINI *et al.*, 1988).

Assim como na plataforma continental, o regime de ventos é controlado pela influência da Alta do Atlântico Sul e pela passagem de sistemas frontais, sendo que a cadeia de montanhas da Serra do Mar age como barreira contra estas frentes, resultando na concentração de frentes estacionárias na região das baías (LANA *et al.*, 2000). Os ventos predominantes são do sentido sul e leste, com a incidência de ventos sul bem mais dominante quando se considera ventos muito fortes acima de 6m/s. No entanto, ventos tão intensos correspondem a apenas 16% das medições (GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ, 2006).

Na plataforma externa, as correntes estão associadas ao fluxo em direção ao sul da corrente do Brasil. A circulação na região mediana da plataforma é principalmente gerada pelo vento, mudando de direção sul para norte durante a passagem de sistemas frontais (CASTRO *et al.*, 2005). Na plataforma interna, devido à considerável quantidade de desembocaduras de estuários existentes, o gradiente de pressão baroclínico próximo à costa força as correntes em sentido norte, efeito amplificado durante o inverno pela passagem de sistemas frontais. Essa direção predominante nas correntes pode ser invertida pela ação persistente do Anticiclone Tropical com seus ventos de direção E e NE. (CASTRO *et al.*, 2005).

2.2 DADOS AMOSTRADOS IN SITU

Com o intuito de comparar dados *in situ* aos dados estimados pelo sensor MODIS, foram realizados 4 levantamentos de campo na região do Complexo Estuarino de Paranaguá e plataforma adjacente. Esses levantamentos ocorreram nos meses de março, maio, junho e julho de 2010, a bordo da embarcação Naurú. Os pontos de amostragem foram determinados de maneira arbitrária, com base em informações descritas sobre a dispersão da pluma estuarina do CEP (NOERNBERG, 2001; ANGELOTTI, 2008), e também através de visualizações das imagens de anos anteriores, para que fossem capturadas variabilidades e diferentes concentrações de estimativas dos constituintes ópticos. Ao todo foram 10 pontos de amostragem para cada coleta (Figura 1), sendo 5 no setor interno do CEP e suas desembocaduras, e os outros 5 na plataforma adjacente, correspondendo à região de atuação da pluma estuarina.

As datas das saídas a campo eram variáveis e dependentes de fatores externos, como a passagem do satélite e seu ângulo de visada sobre a região, e principalmente, a condições meteorológicas locais. Tais variáveis podem ser previstas, como a passagem e o ângulo de visada do sensor, através da visualização de imagens de anos anteriores e observação da repetibilidade da área de estudo, assim como as condições meteorológicas, através de consultas a sites especializados. Mesmo assim, a tentativa de realizar campanhas apenas em dias de céu claro, sem nuvens, impediu um maior número de amostragens. Visto a necessidade de um sincronismo com a passagem do satélite, todas as campanhas ocorreram no período da tarde, com início geralmente programado para as 13h, uma vez que o satélite realiza o imageamento da área de estudo entre as 13 e 15h.

Em cada ponto de amostragem, foram realizadas anotações das condições ambientais e as forçantes que ali estavam atuando, como maré, ventos, presença ou ausência de nuvens. Ainda nos pontos, foram realizados perfis com o equipamento CTD, modelo compacto da marca JFE, o qual estima, além de parâmetros como profundidade, temperatura e salinidade, a concentração de clorofila-a, por meio de um sensor de fluorescência. Também foi medida a transparência da água para cálculo da profundidade média de penetração da luz na coluna d'água.

2.3 TRATAMENTO DOS DADOS MEDIDOS IN SITU

Em laboratório, os dados foram organizados em planilhas e os valores de clorofila *a* foram extraídos pela média das concentrações entre a superfície até a profundidade média de desaparecimento do disco de Secchi. Representando de maneira mais fiel possível a estimativa de clorofila por satélite.

Posteriormente, os valores encontrados para clorofila *a* foram comparados aos valores estimados pelo sensor MODIS através de gráficos de dispersão, para investigação de feições e tendências. Os dados foram ainda correlacionados linearmente através do coeficiente de correlação de Pearson (*r*). Aos valores de *r* encontrados, foi aplicada a análise do valor crítico a fim de realizar a verificação estatística de correlação linear. Nas análises abordadas, o valor crítico de *r*, que rejeita a hipótese de existência de correlação entre os dados ficou entre $-0,666 > r < 0,666$ (TRIOLA, 1998). O erro médio quadrático também foi analisado (EMQ) (Equação 1.0 e 1.1).

$$SQE = \sum [Log(Cla algoritmo) - Log(Cla insitu)]^2 \quad (1.0)$$

$$EMQ = \frac{SQE}{n-1} \quad (1.1)$$

Nesta equação, o EMQ representa o quanto o algoritmo se distancia dos valores reais de clorofila, independente de sua magnitude (CARVALHO, 2009), fornecendo índices quantitativos dos desempenhos.

2.4 DADOS DO SENSOR MODIS

As imagens de satélite do sensor MODIS foram obtidas pela NASA através do site <http://laad.gsfc.nasa.gov/>, tendo como referência as coordenadas geográficas da área de estudo (25°-26°S e 48°-49°W). O site disponibiliza uma ferramenta que permite uma pré-visualização das imagens através do dispositivo “Quick Look”, um tipo de miniatura que permite uma classificação referente aos fatores que inviabilizam o uso das imagens. Para o presente trabalho foi verificada a qualidade

das imagens para cada dia dos anos de 2009 e 2010, quanto à presença dos três aspectos que influenciam na utilização das imagens. Como descrito por FREITAS *et al* (2007) e ANGELOTTI (2008), esses aspectos referem-se a presença de nuvens, que é o fator de maior limitação, pois as bandas utilizadas para as observações do oceano não são capazes de atuar na presença de uma camada de nuvens, ao ângulo de visada do sensor durante o imageamento do local de estudo. Outro fator é a presença de ruídos que podem interferir e invalidar os dados obtidos das mesmas, sendo o problema mais comum a presença de uma faixa vertical esbranquiçada resultante da reflexão solar, denominada de *sun glint*, que superestima os valores geofísicos e pode atingir a área de estudo nos meses de verão (FELDMAN *et al*, 2005). As imagens passíveis de uso foram então selecionadas e utilizadas.

Dentre os produtos oferecidos pela NASA, o utilizado foi o MYD01 – *Raw Radiances in Counts*, imagem do nível 1A, em formato HDF (*Hierarchical Data Format*), com informações brutas de radiância para todas as bandas, calibração e navegação (SAVTCHENKO *et al.*, 2004). As imagens foram adquiridas nesse nível bruto para um controle maior sobre as calibrações e transformações realizadas até o produto final desejado.

2.5 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Todo o processamento foi realizado no aplicativo SeaDAS v. 6.1, também disponibilizado pela NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Esse processamento segue uma sequência que constitui:

1. Georreferenciamento das imagens no nível 1A - geração do arquivo modis.GEO, que contém dados de latitude e longitude geodésicos, zênites e azimutes do sol e do satélite, além da altura do terreno a partir do geóide. A partir deste arquivo surgem também as máscaras de delimitação terra/oceano em malha de 1 km x 1 km, para aumentarem e focarem o contraste no oceano, e linha de costa (GFSC / DAAC / NASA, 2010).
2. Delimitação da área de estudo – extração da imagem através das coordenadas – (24.5°S, -29.5°S, -44.5°W, -50°W) e geração de um novo modis.1A e de um novo modis.GEO.

3. Transformação de 1A + GEO para 1B – radiâncias georreferenciadas no topo da atmosfera, calibradas em $Wm^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$ (GFSC / DAAC / NASA, 2010) - geração de três arquivos, com resolução espacial de 1 km, 500 m e 250 m.
4. Transformação de nível 1B para nível 2 – radiâncias calibradas, georreferenciadas, com aplicação de correção atmosférica (a partir de dados meteorológicos como ozônio, pressão, ventos, dentre outros, acessados via FTP durante o processamento) e algoritmos bio-ópticos em resoluções espaciais finais de 1000, 500 ou 250 metros. Assim, o arquivo L1B de entrada precisa ser o de 1 km, pois é o que possui as bandas específicas para a aplicação oceânica e atmosférica. Para este trabalho, foi selecionada, nessa etapa, a correção atmosférica e os produtos bio-ópticos, que fornecem as estimativas de clorofila e o coeficiente de atenuação difusa descendente da água.
5. Tratamento das imagens, mudança de projeção cilíndrica para Mercator, a fim de facilitar a sobreposição e comparação visual das imagens. Recorte geográfico mais preciso da área de estudo, mudança de escala, uso de uma máscara para a porção de terra, inclusão das linhas geográficas.
6. Plotagem dos pontos das coletas *in situ* nas imagens através de janelas espaciais de 3 x 3 pixels, centradas nas coordenadas dos pontos amostrados em campo, e então posterior extração das informações contidas em cada um dos produtos utilizados.

2.6 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

Por se tratar de uma região estuarina, os dados MODIS foram processados utilizando duas correções atmosféricas distintas.

O primeiro método testado corresponde ao modelo padrão de correção atmosférica do sensor MODIS, desenvolvido por GORDON e WANG, 1994. Este método é o padrão na correção de imagens do aplicativo SeaDas, e utiliza as bandas do infravermelho próximo (IVP) para calcular a reflectância dos aerossóis em cada pixel da imagem. As radiâncias centradas nos comprimentos de onda de 748 e 869 nm são usadas para selecionar o modelo de aerossóis para a região estudada. Este procedimento assume o valor de zero para a radiância refletida da água no espectro do IVP.

O segundo método avaliado corresponde ao modelo de processamento para águas turvas de MUMM (*Management Unit of the North Sea Mathematical Models*), proposto por RUDDICK *et al*, (2000), no qual o pressuposto de valor zero de radiância emitida pela água, do modelo padrão, passa a ter a hipótese de homogeneidade espacial da razão de reflectância para os aerossóis e água dentro de uma imagem pelas bandas 748/869 (MOSES *et al*, 2009). Este método assume que a variabilidade do tipo de aerossol é espacialmente limitada (aproximadamente 200 km), assim como a variabilidade do espalhamento pelo particulado é espectralmente limitada no IVP e dominada pela absorção da água, então, a reflectância dos aerossóis é estimada para um pixel de água clara e aplicada ao restante da imagem (CARVALHO, 2009). RUDDICK *et al*, (2006), calculou um valor universal para a razão entre o espalhamento pelos aerossóis nas bandas 748/869, igual a 1,945. Este valor da razão é então utilizado para os dados do sensor MODIS.

2.7 ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA *a* PELOS ALGORITMOS DO SENSOR MODIS

Para cada diferente sensor é atribuído um algoritmo padrão de clorofila, o qual normalmente é emitido como produto Chlor_*a*. Este algoritmo varia de acordo com cada sensor devido às limitações decorrentes das bandas espectrais disponíveis. O padrão de clorofila também é utilizado para os cálculos intermediários que requerem valores de clorofila, tais como correções de reflectância (Ocean Color Documents, 2010).

O sensor MODIS tem como padrão global para clorofila o algoritmo OC3M, que estima a concentração de *clorofila a* (C_a) através da razão entre bandas espectrais, que são relacionadas através de uma função polinomial de quarta ordem, onde R representa a razão máxima entre os maiores valores de reflectância de sensoriamento remoto (R_{sr}) medidos nos comprimentos de onda de 443 e 490 nm - $R_{sr443}^{443} > R_{sr490}^{490}$ (O'REILLY *et al*, 2000):

$$C_a = 10^{(0,283 - 2,753R_{sr} + 1,457R_{sr}^2 + 0,659R_{sr}^3 - 1,403R_{sr}^4)} \quad (2.0)$$

$$R_{sr} = \log_{10} (R_{550}^{443} > R_{550}^{490})$$

O algoritmo global do MODIS apresenta algumas variações, o que gera outros dois produtos de saída, primeiramente o Chlor_oc2, o qual utiliza a mesma função polinomial, diferindo na razão entre as bandas de reflectância de sensoriamento remoto - R_{469}/R_{555} (O'REILLY *et al*, 1998):

$$R_{sr} = \log_{10} \left(\frac{R_{469}}{R_{555}} \right) \quad (3.0)$$

A segunda variação gera o produto Chlor_oc3 é idêntico ao que gera o produto Chlor_a. A diferença entre eles esta nos pressupostos condicionados a este último, tais como erro na estimativa de clorofila se R_{sr555} , R_{sr443} ou $R_{sr490} < 0$, e ainda se $R > 10$ (O'REILLY *et al*, 2000). Visto essa pequena diferença entre esses produtos, espera-se valores muito semelhantes, se não iguais da concentração de clorofila.

Outro algoritmo utilizado para estimativa de clorofila, disponível para o sensor MODIS, é o modelo semi-analítico GSM (GARVER & SIEGEL, 1997; MARITORENA *et al*, 2002), baseado na relação quadrática entre a reflectância de sensoriamento remoto (R_{sr}), os coeficientes de absorção (a), retroespalhamento (b_b) de Gordom *et al*, (1988), além das constantes (g_i, t, n_w) definidas pela IOCCG, 2006:

$$R_{rs}(\gamma) = \frac{t^2}{n_w^2} \sum_{i=1}^2 g_i \left(\frac{b_b(\gamma)}{b_b(\gamma) + a(\gamma)} \right)^i \quad (4.0)$$

Onde:

O valor da concentração de clorofila (C) é estimado através do coeficiente de absorção do fitoplâncton devido à clorofila a_{ph}^* , que é estimado pela decomposição do coeficiente total de absorção a_{ph} :

$$a_{ph}(\gamma) = C a_{ph}^*(\gamma) \quad (5.0)$$

Este algoritmo foi primeiramente desenvolvido para águas oceânicas, mas apresenta um bom desempenho para águas costeiras (IOCCG, 2006).

2.8 ACOMPANHAMENTO DA VARIABILIDADE ANUAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA *a*

Através do resultado da correlação dos dados de clorofila obtidos *in situ* e pelo sensor MODIS, o melhor algoritmo e a correção atmosférica mais adequada para a área de estudo foram utilizados para um acompanhamento da concentração de clorofila durante o período de junho de 2009 a julho de 2010.

Para este período foram averiguadas as imagens MODIS que forneciam informações adequadas sobre os mesmos pontos de amostragem. Também foram utilizados dados de precipitação diária durante esse período anual para análise de uma possível correlação entre os valores.

Foram utilizados os dados de precipitação disponibilizados pela estação meteorológica localizada em frente ao Centro de Estudos do Mar, sob os cuidados do Grupo de Física Marinha. Esses dados foram adquiridos na forma bruta, com valores de precipitação horários. Em laboratório esses dados foram tratados, de forma a serem transformados em precipitação diária, e também foi somada a precipitação de até uma semana antes as datas das imagens para identificar uma possível correlação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão divididos de acordo com a ordem de trabalho, primeiramente são apresentados os valores adquiridos *in situ*. Em seguida, os dados das imagens disponíveis nas datas mais próximas as saídas a campo, e então a comparação entre tais dados. Posteriormente, os dados do acompanhamento da concentração de clorofila durante o período de um ano, entre junho de 2009 a julho de 2010, adquiridos a partir do algoritmo e da correção atmosférica que apresentaram a melhor resposta as concentrações encontradas em campo.

3.1 DADOS DE CAMPO

A primeira, terceira e quarta coletas ocorreram na maré de quadratura, no período de vazante, enquanto a segunda coleta ocorreu no período de enchente de uma maré de sizígia (Tabela 1).

Os valores da concentração de clorofila variam significativamente entre os pontos da porção interna do estuário, correspondente aos pontos 1, 2, 3 e 11, sendo sempre maiores do que na porção externa, correspondente aos demais pontos (Figura 2).

Tabela 1: Marés referentes aos dias, e em destaque, o período das coletas.
Fonte: Diretoria De Hidrografia E Navegação (DHN)

Marés							
Quadratura		Sizígia		Quadratura		Quadratura	
23/03	Altura (m)	04/05	Altura (m)	08/06	Altura (m)	06/07	Altura(m)
01h26	1.0	02h23	1.1	07h06	0.4	01h04	0.7
05h41	0.7	05h56	0.8	12h38	1.3	03h41	0.7
08h53	0.9	07h58	0.9	18h26	0.4	06h51	0.6
13h43	0.6	13h02	0.4			11h23	1.1
16h53	0.6	19h04	1.2			17h15	0.5
		23h00	0.6			22h13	1.0

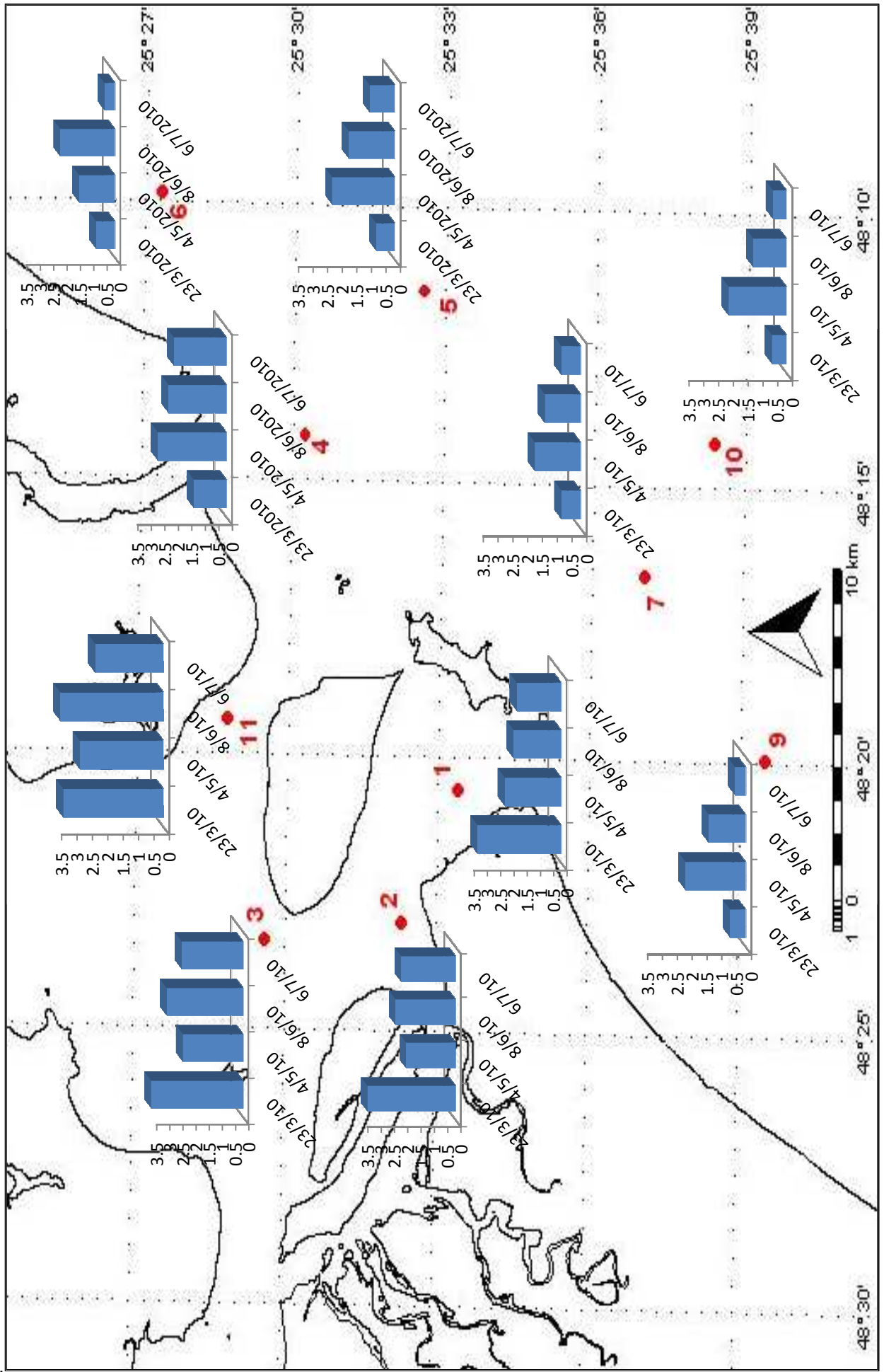
Para a primeira coleta (23/03/10), os valores da porção interna foram os mais elevados dentre todas, apresentando concentrações de clorofila próximas a $3,5 \text{ mg/m}^3$, enquanto que os demais pontos pertencentes a porção da plataforma rasa tiveram concentrações homogêneas e menores que $1,5 \text{ mg/m}^3$. Esta coleta apresentou maior gradiente de variação entre as distintas regiões (interna - externa). A transparência da água variou de 2 metros no ponto três a 6 metros no ponto sete, tendo como média geral 3,8 metros.

A coleta de 4 de maio apresentou valores menores do que a de março para a região interna, variando de $1,8 \text{ mg/m}^3$ no ponto dois a $2,7 \text{ mg/m}^3$ no ponto onze. A porção externa apresentou valores que variam de 1,3 a $2,5 \text{ mg/m}^3$ para os pontos seis e quatro respectivamente. Nesta coleta observou-se maior homogeneidade entre todos os pontos, tanto na região interna quanto na externa ao estuário. A transparência da água foi semelhante à primeira coleta, encontrando nos mesmos pontos, três e sete, o valor mínimo e máximo de 1,5 e 6 metros respectivamente. A média entre todos os pontos foi de 3,3 metros.

Os valores estimados na saída a campo do dia 8 de junho apresentam heterogeneidade para as concentrações de clorofila nas duas regiões. Na porção interna os valores variaram de 1,7 a $3,3 \text{ mg/m}^3$, nos pontos um e onze respectivamente. Já na porção externa o ponto dez, mais distante do estuário, apresentou o valor mínimo de clorofila de $1,1 \text{ mg/m}^3$, enquanto que no ponto verificou-se o valor máximo de $2,1 \text{ mg/m}^3$. Esta coleta apresentou valores com variação mais acentuada entre as regiões. A transparência da água variou de 2 a 10 metros para os pontos três e dez, respectivamente. A média calculada foi de 5 metros.

Na coleta de 7 de julho observou-se um gradiente bem definido entre as regiões abordadas, com concentrações homogêneas de clorofila. Na região interna estes valores ficaram próximos a 2 mg/m^3 , enquanto que na região externa a $0,5 \text{ mg/m}^3$. Nesta coleta os dados de transparência da água não foram mensurados.

Dentre todas as coletas, o ponto onze, pertencente à região interna do CEP, apresentou as maiores concentrações de clorofila, enquanto que o ponto dez, pertencente à região da plataforma adjacente, os menores valores.



gem.

3.2 ALGORITMOS DO SENSOR MODIS COMPARADOS AOS DADOS DE CAMPO E AS DISTINTAS CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS.

Foram encontrados alguns fatores que interferiram e por muitas vezes inviabilizaram o uso de certas imagens, como a presença de nuvens e a posição orbital do satélite sobre a área de estudo. Problemas estes também encontrados por FELDMAN *et al.*, (2005), RUDDICK *et al.*, (2006) e MOSES *et al.*, (2009).

FREITAS *et al.* (2007) identificaram esses mesmos fatores influenciando as imagens do sensor MODIS sobre o Complexo Estuarino de Paranaguá e plataforma adjacente. Dos problemas observados, o fator mais relevante foi à presença de nuvens sobre a área de estudo, pois as bandas que medem as informações da água do mar não penetram a camada de nuvens. Por ser uma variável dependente de condições meteorológicas, a presença de nuvens é um fator regional. O tamanho da área a ser estudada tem relação direta com essa variável, pois se espera que em locais menores a probabilidade desta área ser imageada com nuvens também seja menor.

O segundo fator mais relevante está relacionado à posição da área de estudo em relação ao campo de visada do sensor, também chamado de *swath*. As imagens com informações mais precisas são aquelas que apresentam a área de estudo na porção central do campo de visada (RUDDICK *et al.*, 2006; FREITAS *et al.*, 2007). A imagem em que a região de estudo está próxima às bordas tem suas informações comprometidas devido à distorção ocasionada pelo fato da projeção ser cilíndrica. Este deslocamento orbital é uma variável comprometidora para todas as regiões.

Para a comparação das informações geradas *in situ*, foram analisados os fatores comprometedores e escolhidas as imagens, mais próximas aos dias das coletas de campo, as quais representavam as informações sobre os pontos de coleta. A saída a campo do dia 22 de março não pode ser comparada aos dados do sensor, pois não foram encontradas imagens com informações adequadas nas datas próximas há esse dia. O ponto dois, localizado em uma área rasa próxima a uma porção de terra, foi descartado das análises, pois para muitas imagens essa região é considerada como terra, não fornecendo assim informações sobre a coluna d'água. Todas as imagens foram centradas nas coordenadas geográficas da área de estudo (25°-26°S e 48°-49°W).

3.2.1 Campanha do dia 04/05/2010

Os valores adquiridos na saída a campo do dia 4 de maio foram comparados a imagem do dia 6 do mesmo mês.

Primeiramente foram realizadas as comparações com as imagens da correção atmosférica Padrão (Figura 3). Para o algoritmo Chlor_a, os valores demonstraram heterogeneidade, com valores máximos na porção interna e mínimos na externa, a concentração de clorofila variou entre 2,9 e 14,1 mg/m³. O valor do coeficiente de correlação (r) entre os dados de campo e do algoritmo Chlor_a foi de -0,546, e o erro médio quadrático (EMQ) foi de 0,23. O valor de r demonstrou uma não correlação entre os dados. Os valores do algoritmo superestimam os dados de campo de tal forma que os pontos não apresentaram uma tendência significativa (Figura 4).

Os dados do algoritmo Chlor_oc2 apresentaram tendência semelhante a do Chlor_a, com valor máximo de clorofila de 13,4 mg/m³, no mesmo ponto interno, mas diferente do primeiro algoritmo, o ponto com valor mínimo de 2,3 mg/m³ se encontra na porção interna do CEP. O valor de coeficiente de correlação foi de -0,501 e o EMQ foi de 0,185. O valor de r novamente implicou em uma não correlação entre os dados, mas o EMQ foi inferior ao anterior, o que indicou maior proximidade entre as concentrações estimadas pelo sensor MODIS e adquiridas *in situ* (Figura 5).

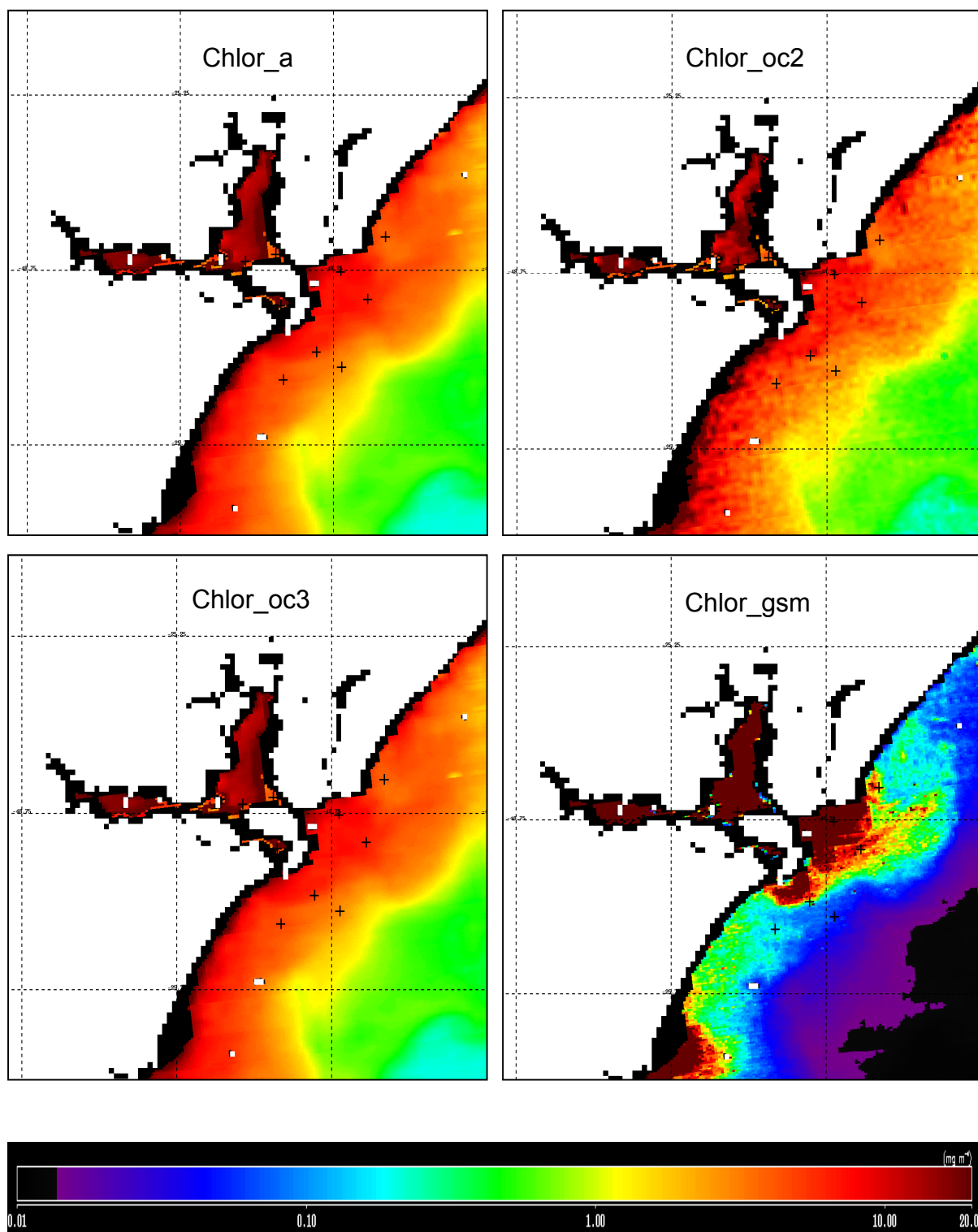


Figura 3: Imagens MODIS do dia 6 de maio correspondente aos algoritmos que estimam a concentração de clorofila a utilizando a correção atmosférica Padrão.

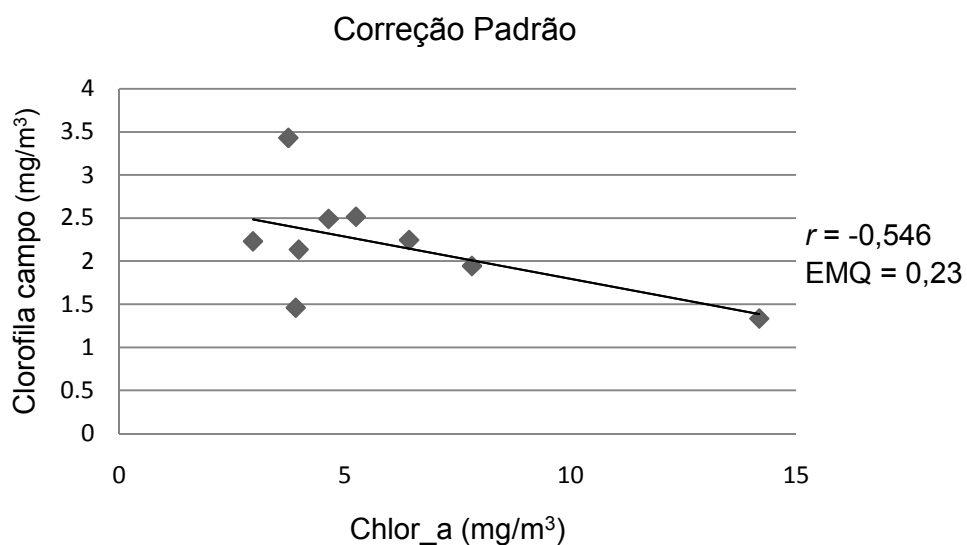


Figura 4: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_a e para a correção atmosférica Padrão.

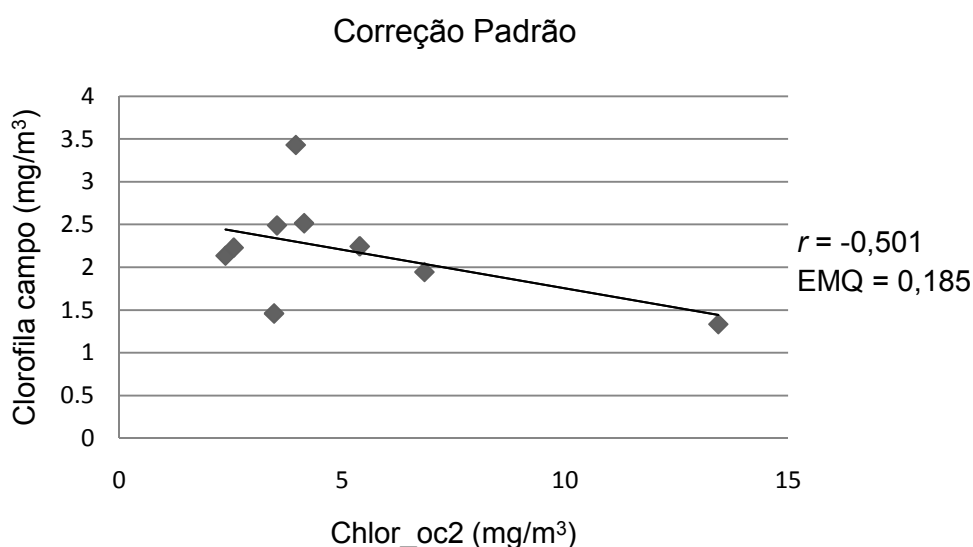


Figura 5: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc2 e para a correção atmosférica Padrão.

O algoritmo Chlor_oc3 apresentou valores iguais aos do Chlor_a para todos os pontos, com exceção apenas do ponto um, o qual apresentou a estimativa máxima de clorofila, de 26,2 mg/m³. Este algoritmo obteve a menor correlação com os valores de campo, com o coeficiente de correlação de -0,289 e um EMQ de 0,354. A correlação linear não foi significativa e o valor do EMQ foi alto, evidenciando a fraca tendência (Figura 6) e a elevada distância entre as concentrações reais e as estimadas pelo sensor.

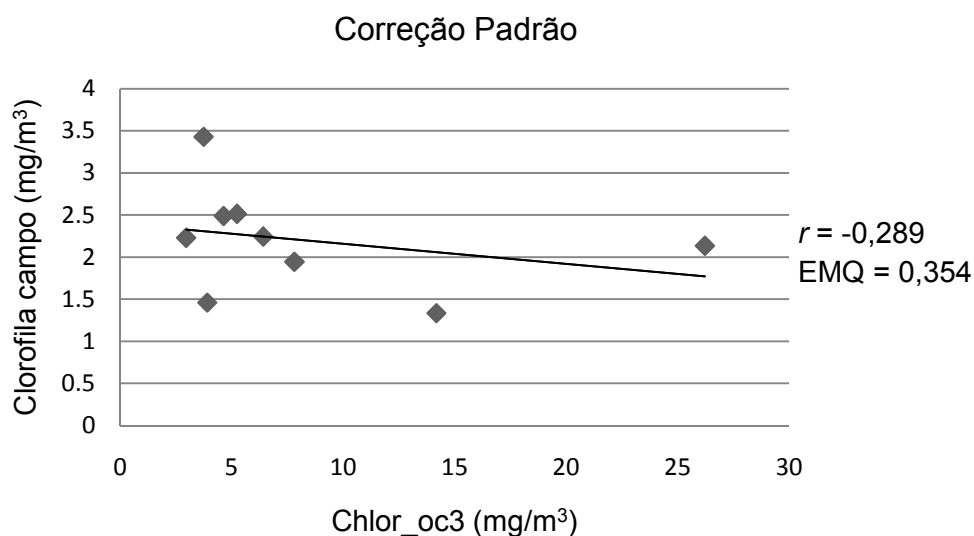


Figura 6: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc3 e para a correção atmosférica Padrão.

O algoritmo Chlor_gsm apresentou valores muito elevados de clorofila, chegando a um máximo de $87,6 \text{ mg/m}^3$ na região estuarina, e um mínimo de $4,5 \text{ mg/m}^3$ na região da plataforma adjacente ao CEP. Esse elevado gradiente apresentou a maior tendência entre os dados encontrada até então (Figura 7), embora como visto pelo coeficiente de correlação de $-0,543$, ainda não tenha apresentado linearidade entre os valores.

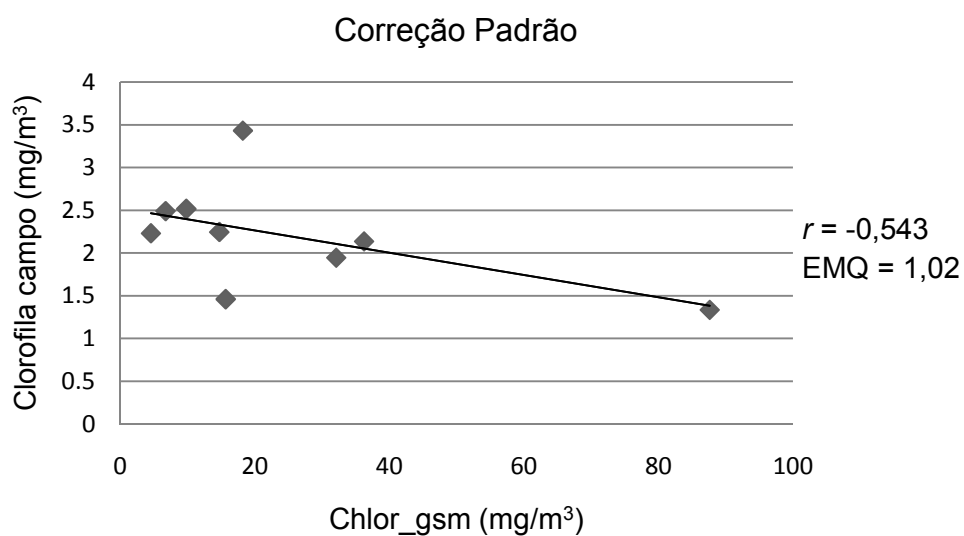


Figura 7: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_gsm e para a correção atmosférica Padrão.

O EMQ de 1,020 foi o valor mais alto quando comparado aos algoritmos testados com a correção atmosférica padrão, evidenciando a elevada distância entre os valores estimados em campo dos dados adquiridos pelo sensor.

Em seguida, os dados de campo foram comparados aos mesmos algoritmos com a correção atmosférica de MUMM (Figura 8).

Os valores estimados pelo algoritmo Chlor_a são bem homogêneos, com poucas variações nos dados de clorofila. A maior concentração ocorreu na porção interna, com máximo de 3,07 mg/m³, e a menor na porção externa, apresentando mínimo de 1,11 mg/m³. O valor do coeficiente de correlação entre os dados de campo e do algoritmo Chlor_a foi de -0,469, e o erro médio quadrático foi de 0,05. Os dados não apresentaram uma tendência demarcada (Figura 9), fator esse corroborado pelo valor de r não correlato, mas o baixo EMQ indicou uma proximidade entre os dados de campo e do sensor.

O algoritmo Chlor_oc2 apresentou valores mais homogêneos que os dados anteriores, com valor máximo de 2,19 e mínimo de 1,1 mg/m³, localizados na porção interna e externa respectivamente. O coeficiente de correlação foi de -0,318 e o EMQ de 0,04. Os dados apresentaram uma tendência menor do que a do algoritmo anterior (Figura 10), com valor de r indicando não linearidade, mas o EMQ inferior ao do algoritmo Chlor_a indicou proximidade entre os dados de campo e de satélite.

O algoritmo Chlor_oc3 apresentou novamente valores semelhantes aos do algoritmo Chlor_a, com diferença apenas no ponto um, no qual foi encontrada a maior concentração de clorofila, de 3,79 mg/m³. Estes dados apresentaram uma fraca tendência (Figura 11), com valor de correlação de -0,383, novamente não apresentando significância. O EMQ de 0,05 foi idêntico ao encontrado para o algoritmo Chlor_a, indicando que os dados comparados apresentam proximidade em seus valores.

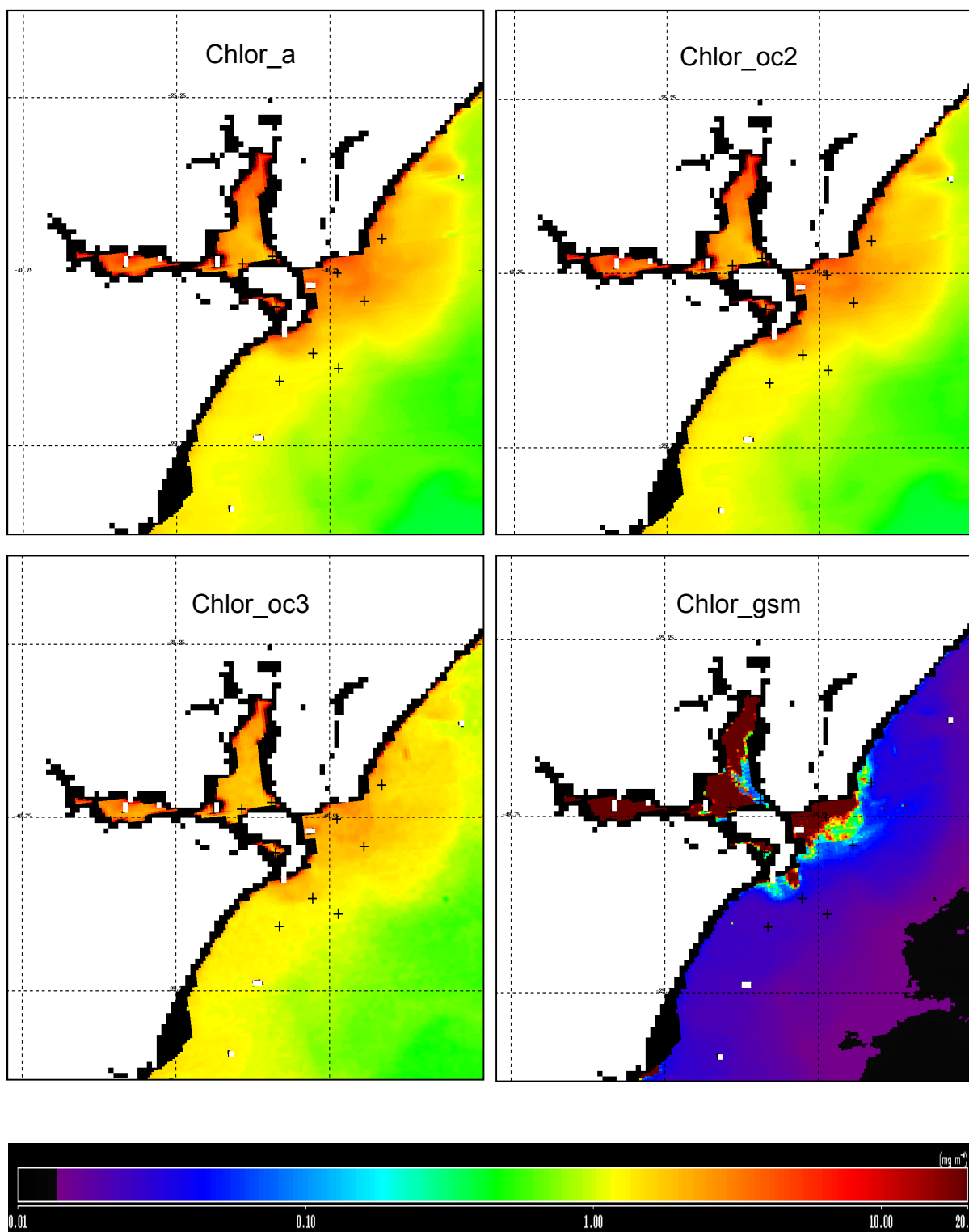


Figura 8: Imagens MODIS do dia 6 de maio correspondente aos algoritmos que estimam a concentração de clorofila a utilizando a correção atmosférica de MUMM.

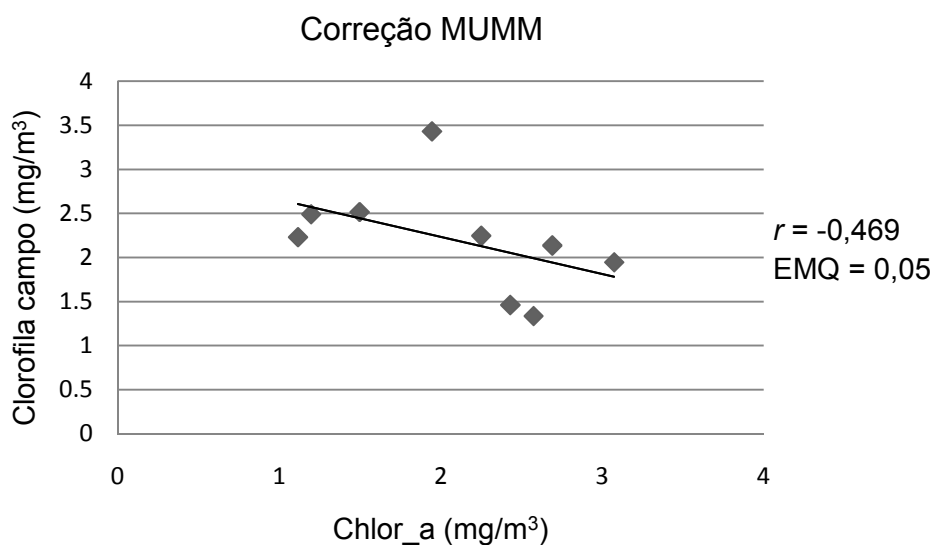


Figura 9: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_a e para a correção atmosférica de MUMM.

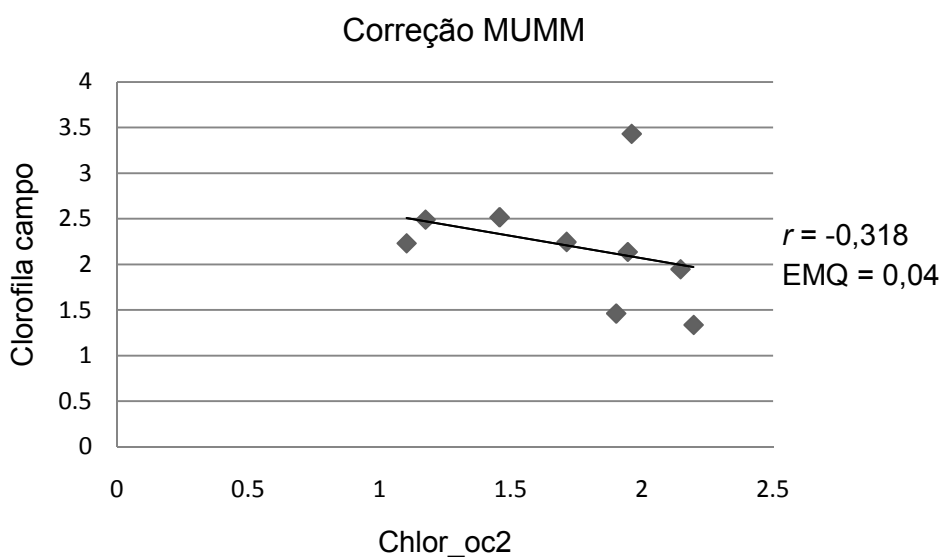


Figura 10: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc2 e para a correção atmosférica de MUMM.

O algoritmo Chlor_gsm apresentou elevadas concentrações de clorofila na porção interna do CEP, chegando ao máximo de 51,8 mg/m³. Na plataforma adjacente os valores foram menores, com mínimo de 1,8 mg/m³. O elevado gradiente entre as regiões interna e externa implicou em uma fraca tendência entre os dados (Figura 12). Esse fator é corroborado pelo valor da correlação, que foi de -0,571, indicando não linearidade entre os dados. O EMQ de 0,47 foi o mais alto

dentre os algoritmos testados com a correção atmosférica de MUMM, indicando uma relativa distância entre os dados adquiridos *in situ* e pelo sensor MODIS.

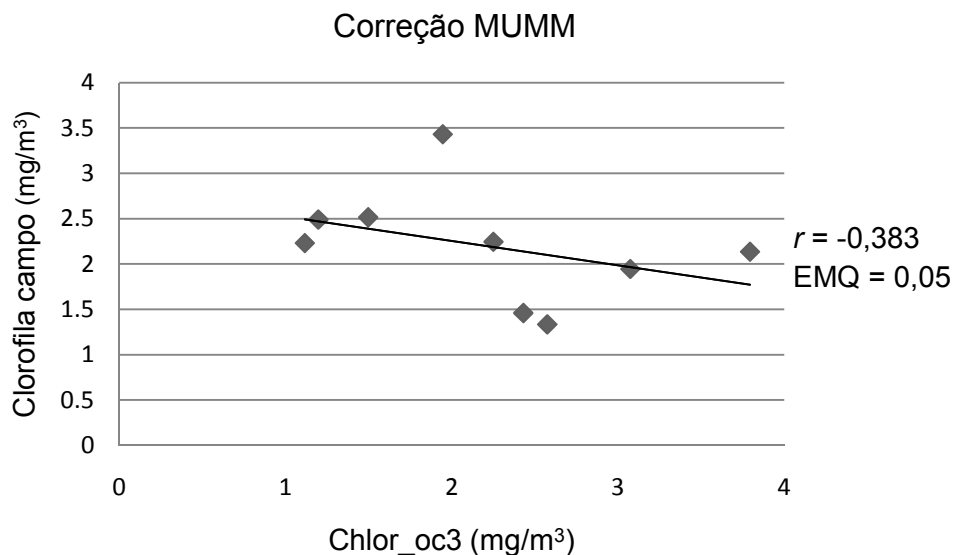


Figura 11: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc3 e para a correção atmosférica de MUMM.

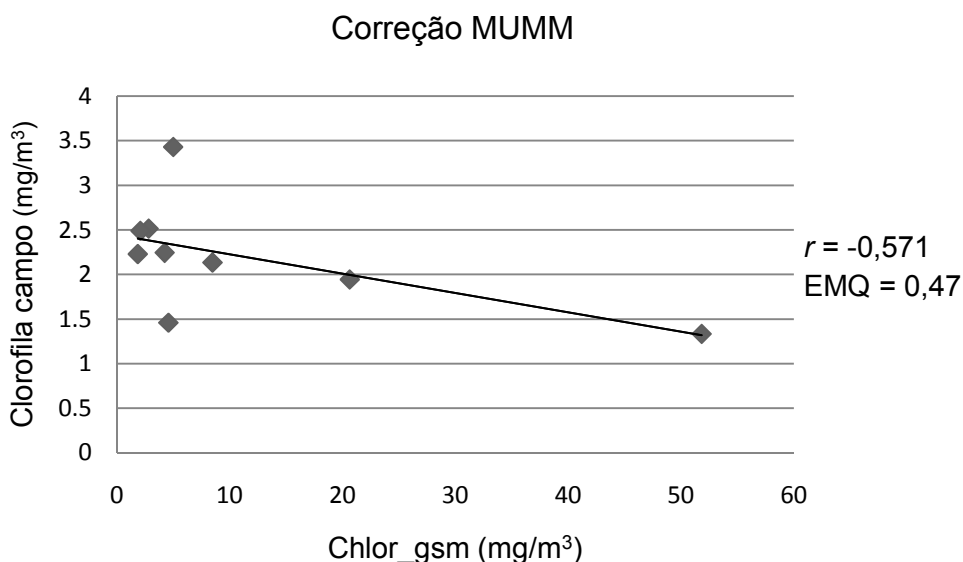
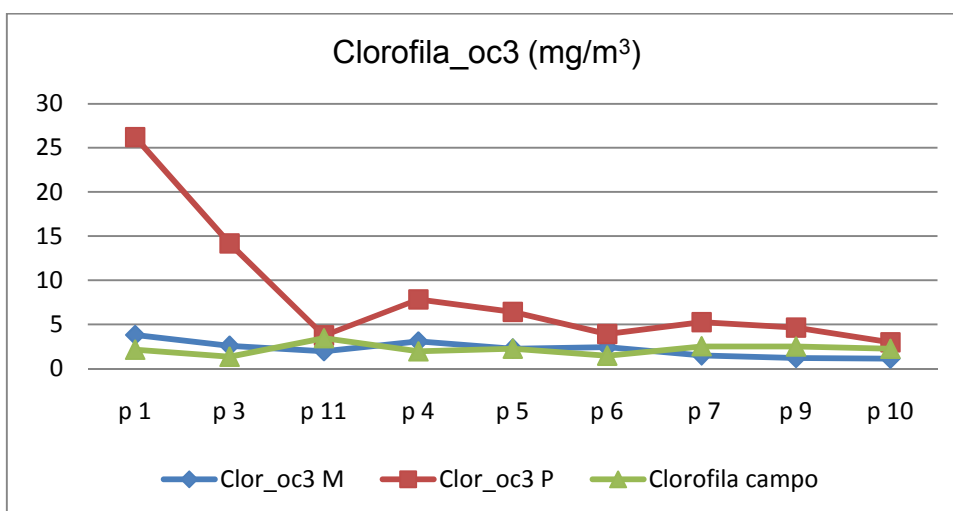
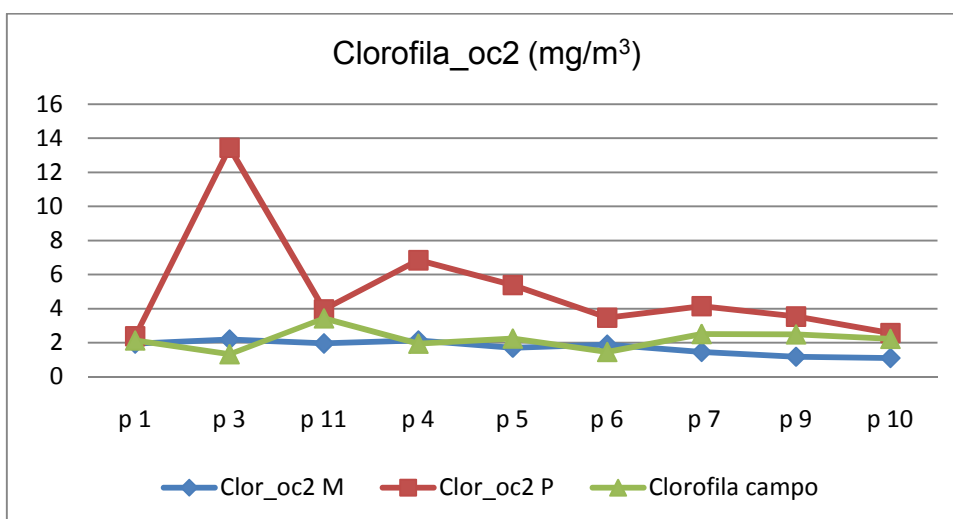
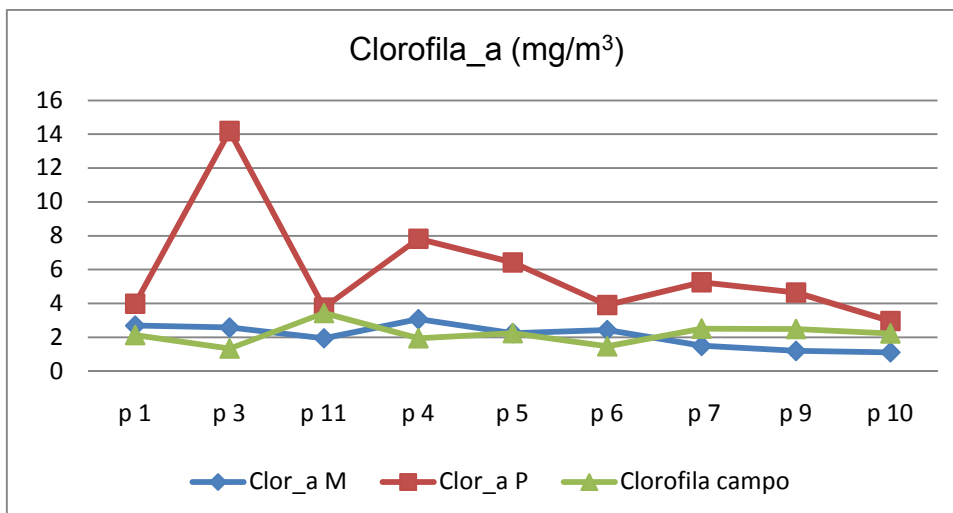


Figura 12: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_gsm e para a correção atmosférica de MUMM.

Para demonstrar as diferenças entre os valores em cada ponto de amostragem, foram produzidos gráficos utilizando os dois tipos distintos de correção atmosférica (Figura 13). Com isto, foi possível determinar os pontos em que os valores apresentaram as maiores diferenças e identificar suas possíveis causas.



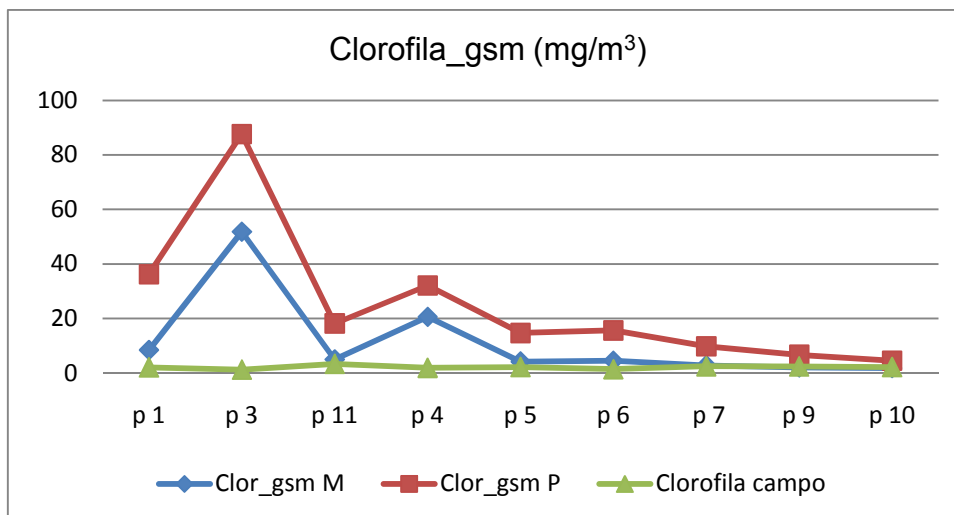


Figura 13: Variação da concentração de clorofila nos pontos amostrais entre os dados adquiridos *in situ* e pelos algoritmos, com duas correções atmosféricas distintas. M – corresponde a correção de MUMM; P – corresponde a correção Padrão.

Foram encontradas correlações negativas, para todos os algoritmos e correções atmosféricas, as quais indicaram que os valores estimados pelo sensor são inversamente proporcionais aos dados adquiridos em campo. Essa tendência foi gerada devido ao levantamento *in situ* ocorrer durante o período de enchente de uma maré de sizígia, enquanto que o sensor MODIS passou sobre a área de estudo captando informações no período de vazante de uma maré de quadratura. O simples fato de a zona costeira ser um sistema altamente dinâmico, já dificulta uma precisa comparação entre as informações (MOSES *et al.* 2009), a qual fica ainda mais comprometida quando se tem dias entre a aquisição dos dados. A variação das marés implica em diferenças nas concentrações de clorofila, pois em períodos de sizígia esperam-se maiores valores de clorofila, tanto para o setor interno quanto ao externo do estuário, devido ao aumento de áreas alagáveis, elevando o transporte de matéria orgânica e nutriente para a coluna d'água. Com isso, as concentrações menores são esperadas em marés de quadratura, como observado pela estimativa dos algoritmos, que apresentaram decréscimo das concentrações de clorofila para os pontos mais externos ao estuário, enquanto que os dados obtidos *in situ* se mantiveram homogêneos.

Face ao observado, os algoritmos processados com a correção atmosférica Padrão não apresentaram um bom desempenho. Tais produtos superestimaram as concentrações de clorofila relativamente na mesma proporção, com maiores discrepâncias localizadas nos pontos do setor interno do estuário (p1, p3 e p4).

Embora tenham apresentado correlações negativas e não significativas, os algoritmos processados com a correção atmosférica de MUMM responderam, de maneira geral, melhor aos dados adquiridos *in situ*. As concentrações super e subestimaram os valores em diferentes pontos, possivelmente devido à diferença entre o período e a intensidade da maré, mas tais estimativas permaneceram próximas aos dados reais.

Analisando o erro médio quadrático foi observado que o algoritmo Chlor_oc2 apresentou as concentrações de clorofila mais próximas às encontradas em campo. Para ambas as correções, o algoritmo Chlor_gsm apresentou as maiores concentrações de clorofila, tendo este o pior desempenho dentre todos.

3.2.2 Campanha do dia 08/06/2010

Os valores adquiridos na saída a campo do dia 8 de junho foram comparados a imagem do dia anterior.

A primeira comparação ocorreu com as imagens processadas com a correção atmosférica Padrão (Figura 14). Para o algoritmo Chlor_a, os dados apresentaram uma distinção bem marcada entre as regiões interna e externa do CEP, com concentrações máxima de $19,7 \text{ mg/m}^3$ na porção interna e mínima de $2,5 \text{ mg/m}^3$ na plataforma adjacente. O valor do coeficiente de correlação foi de 0,912, e o erro médio quadrático de 0,292. As concentrações de clorofila apresentaram uma forte tendência (Figura 15), e uma correlação linear significativa. Mas o valor do EMQ indicou uma distância entre os dados, com o sensor MODIS superestimando as concentrações de clorofila para todos os pontos amostrados.

O algoritmo Chlor_oc2 apresentou valores maiores que o anterior para a região interna do CEP, com valor máximo de $28,3 \text{ mg/m}^3$ e valor mínimo de $2,4 \text{ mg/m}^3$ para a região da plataforma adjacente. O coeficiente de correlação foi de 0,875 e o EMQ foi de 0,348. Embora tenha apresentado menor tendência em relação ao algoritmo anterior (Figura 16), o valor de r demonstrou linearidade entre os dados. O EMQ também foi superior ao anterior, o que evidenciou uma maior distância entre os dados de campo e do sensor.

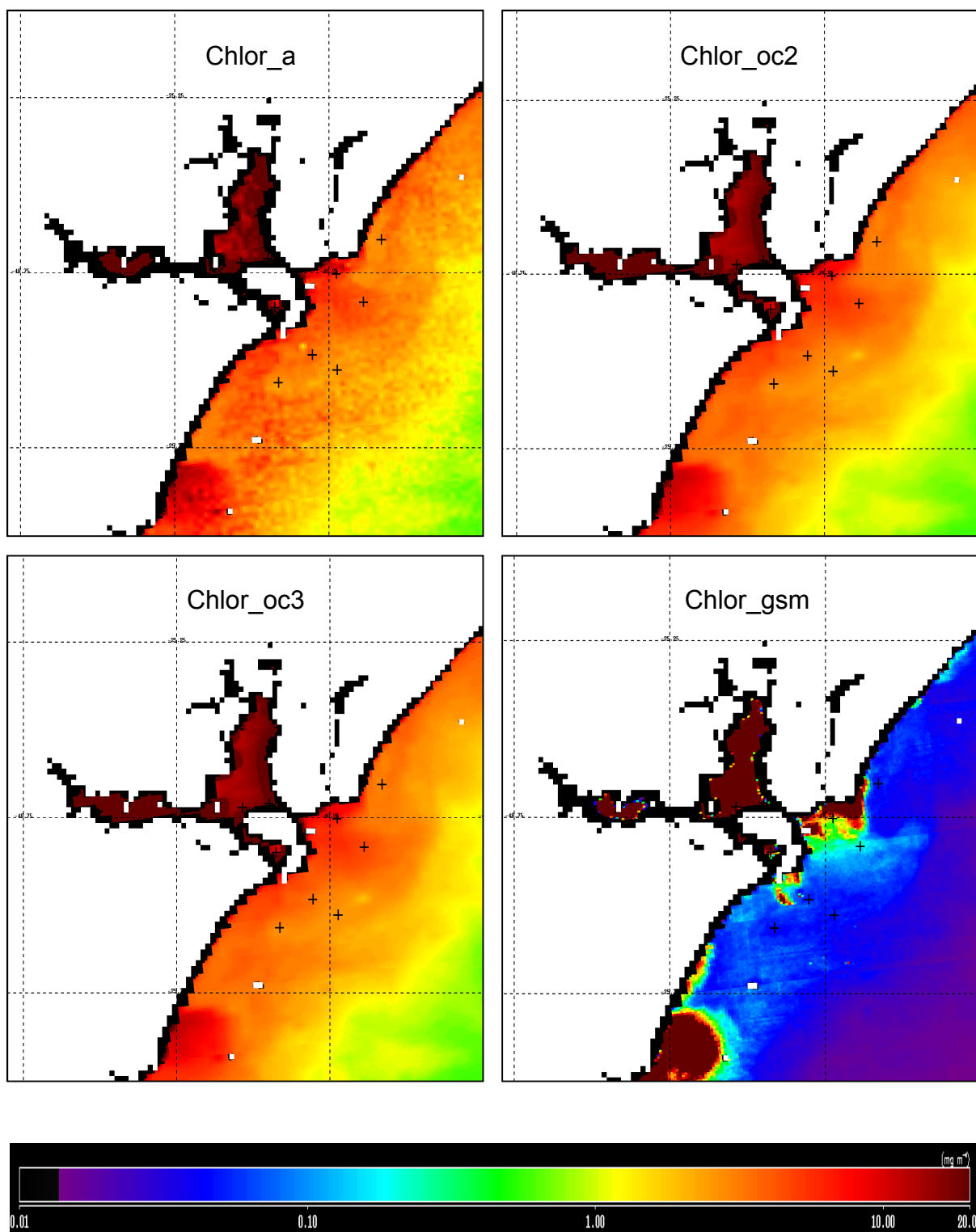


Figura 14: Imagens MODIS do dia 7 de junho correspondente aos algoritmos que estimam a concentração de clorofila a utilizando a correção atmosférica Padrão.

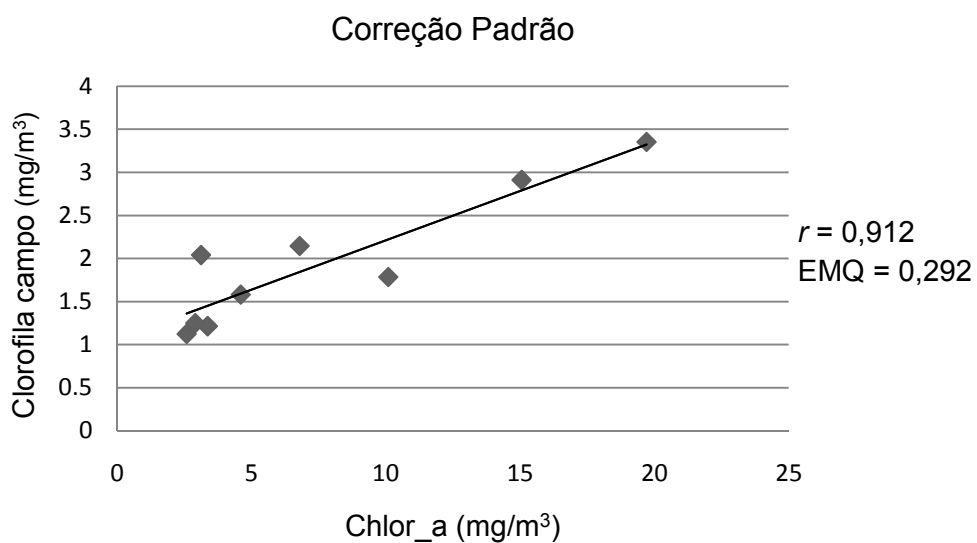


Figura 15: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_a e para a correção atmosférica Padrão.

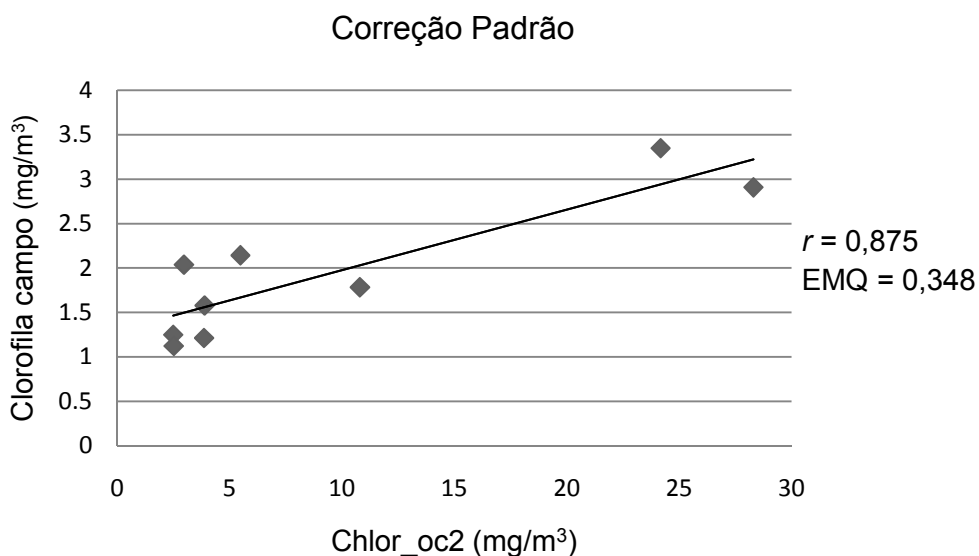


Figura 16: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc2 e para a correção atmosférica Padrão.

O algoritmo Chlor_oc3 apresentou as mesmas concentrações de clorofila encontradas pelo algoritmo Chlor_a, e conseqüentemente os mesmos valores do coeficiente de correlação (0,912) e erro médio quadrático (0,292). Os dados apresentaram uma forte tendência (Figura 17), com valores correlatos. O EMQ indicou uma distância entre os dados, com o sensor MODIS superestimando as concentrações de clorofila para todos os pontos amostrados.

Os valores encontrados pelo algoritmo Chlor_gsm foram os mais altos perante os outros algoritmos, com um máximo de clorofila na região interna do CEP,

chegando a $42,1 \text{ mg/m}^3$, na parte externa ao estuário a estimativa de clorofila mínima foi de $3,7 \text{ mg/m}^3$. O valor do coeficiente de correlação foi de $0,727$ e o EMQ de $0,552$. Os dados superestimam consideravelmente os valores de campo, e devido a isso apresentaram a menor tendência entre os algoritmos com a correção Padrão (Figura 18). Mesmo assim o valor de r indicou linearidade entre os dados, mas o erro médio quadrático foi o mais alto entre os produtos, comprovando a discrepância entre os valores.

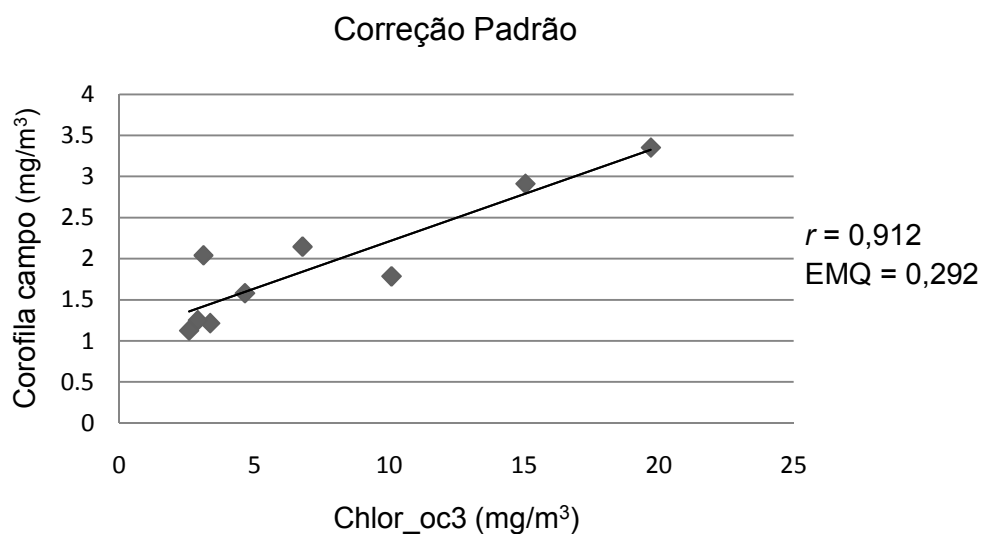


Figura 17: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc3 e para a correção atmosférica Padrão.

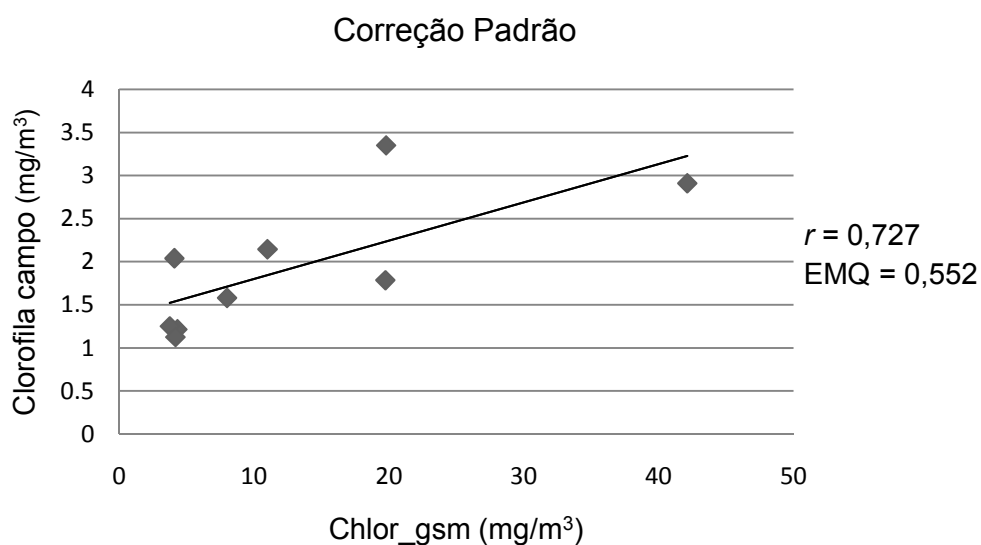


Figura 18: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_gsm e para a correção atmosférica Padrão.

Em seguida, os valores de campo foram comparados aos mesmos algoritmos com a correção atmosférica de MUMM (Figura 19).

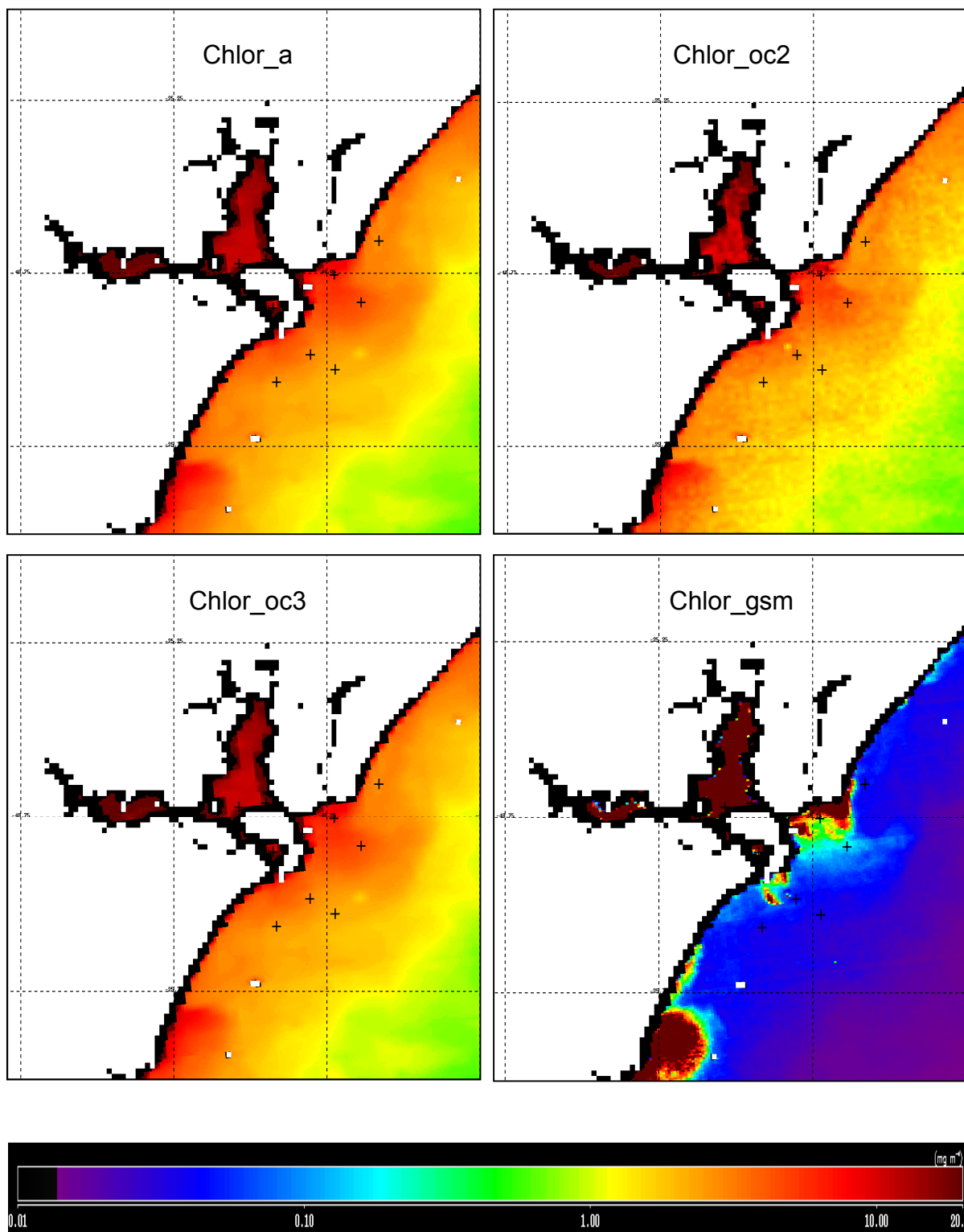


Figura 19: Imagens MODIS do dia 7 de junho correspondente aos algoritmos que estimam a concentração de clorofila a utilizando a correção atmosférica de MUMM.

Os valores estimados pelo algoritmo Chlor_a demonstraram um gradiente bem demarcado entre as porções interna e externa do CEP. A maior concentração de clorofila foi de 13,5 mg/m³, e a menor de 2,1 mg/m³. O coeficiente de correlação foi de 0,843 e o EMQ de 0,237. Os dados apresentaram forte tendência (Figura 20), corroborada pelo valor de r . O EMQ indicou discrepância entre os dados, visto que as concentrações estimadas pelo sensor são superiores as adquiridas *in situ*.

O algoritmo Chlor_oc2 apresentou concentrações de clorofila superiores as estimadas pelo algoritmo anterior para a parte interna do estuário, com estimativa máxima de 19,2 mg/m³, enquanto que na porção externa do CEP as estimativas foram semelhantes, com valor mínimo de 1,9 mg/m³. O coeficiente de correlação foi de 0,865 e o EMQ de 0,269. Os valores apresentaram linearidade e uma forte tendência (Figura 21), mas o EMQ levemente superior ao do produto anterior demonstrou que os dados do sensor MODIS são mais distantes dos adquiridos em campo.

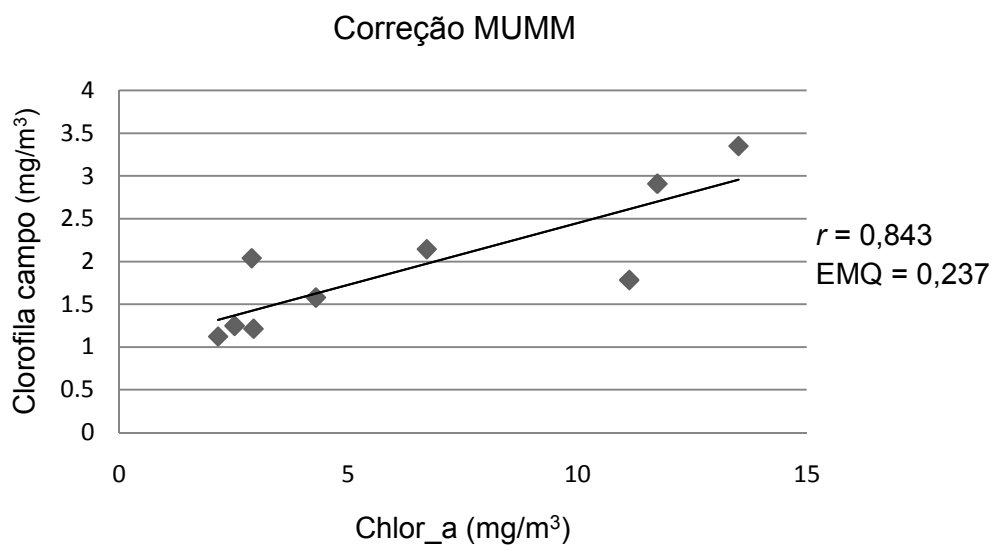


Figura 20: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_a e para a correção atmosférica de MUMM.

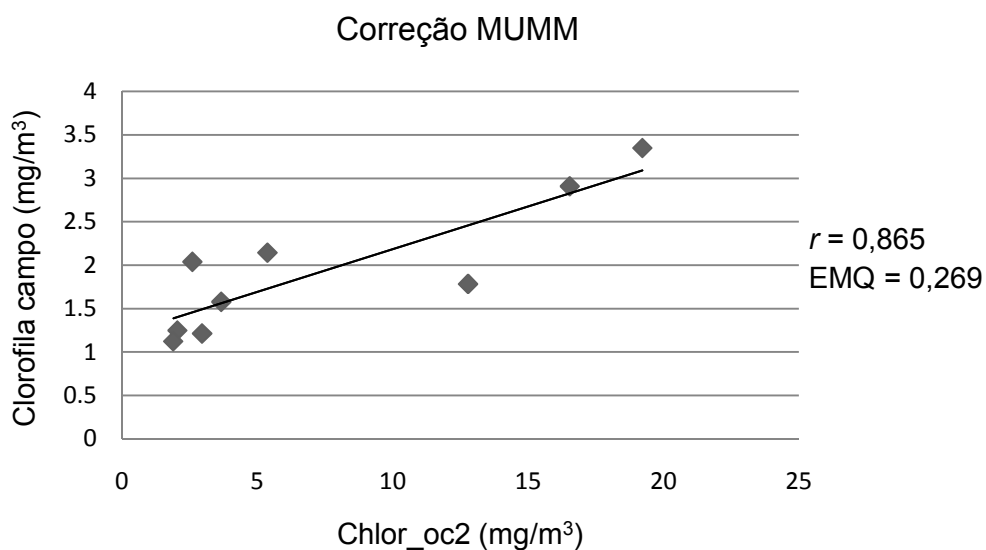


Figura 21: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc2 e para a correção atmosférica de MUMM.

O algoritmo Chlor_oc3 apresentou concentrações de clorofila idênticas às encontradas pelo algoritmo Chlor_a e, conseqüentemente, valores semelhantes do coeficiente de correlação (0,843) e do erro médio quadrático (0,238). Os dados apresentaram uma forte tendência (Figura 22), com o valor de r indicando linearidade. O EMQ indicou uma distância entre os dados, com o sensor MODIS superestimando as concentrações de clorofila para todos os pontos amostrados.

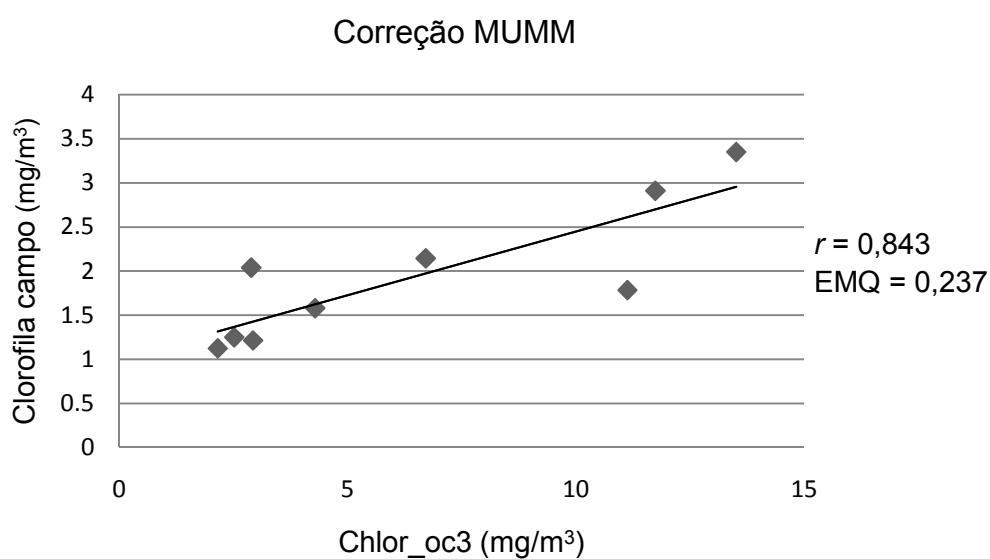


Figura 22: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc3 e para a correção atmosférica de MUMM.

O algoritmo Chlor_gsm apresentou novamente as estimativas mais altas com relação aos demais algoritmos utilizando a correção atmosférica de MUMM. O valor máximo de clorofila de $41,8 \text{ mg/m}^3$ foi encontrado na porção interna do estuário, enquanto que o mínimo de $3,3 \text{ mg/m}^3$ estava localizado na plataforma adjacente. Os valores superestimados pelo sensor não implicaram significativamente no valor do coeficiente de correlação, que foi de 0,806, mas influenciaram o EMQ, que apresentou o valor de 0,552. Embora os dados apresentassem uma forte tendência (Figura 23), pelo EMQ observou-se uma distância representativa entre os dados de campo e do sensor MODIS.

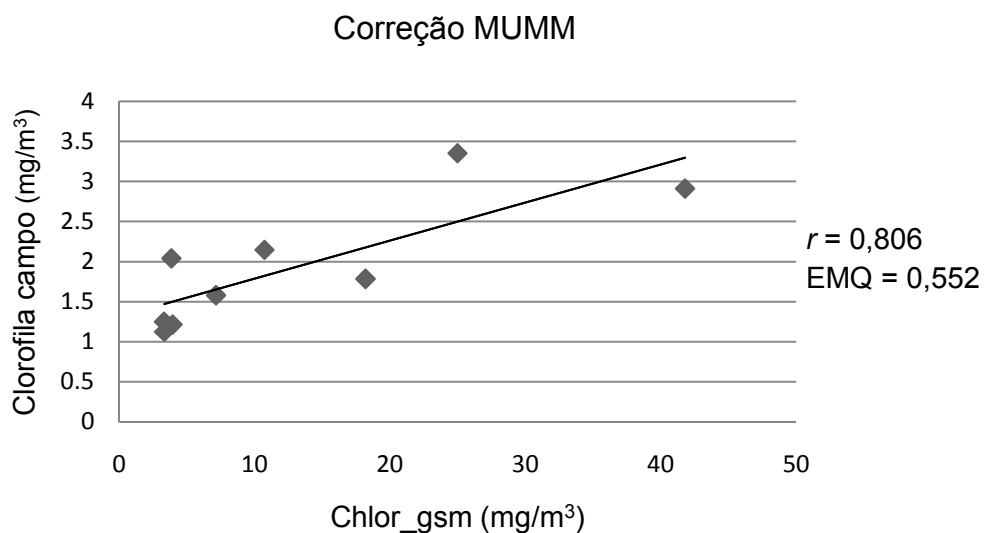
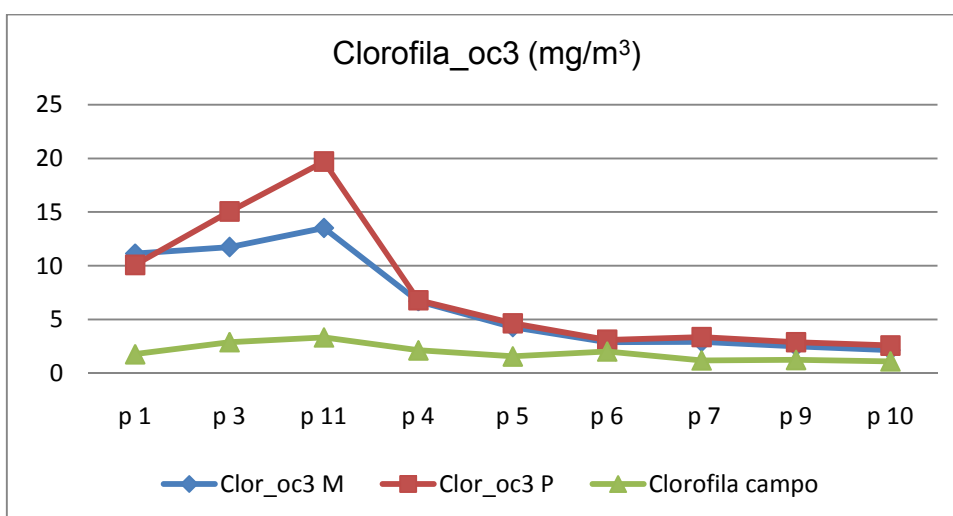
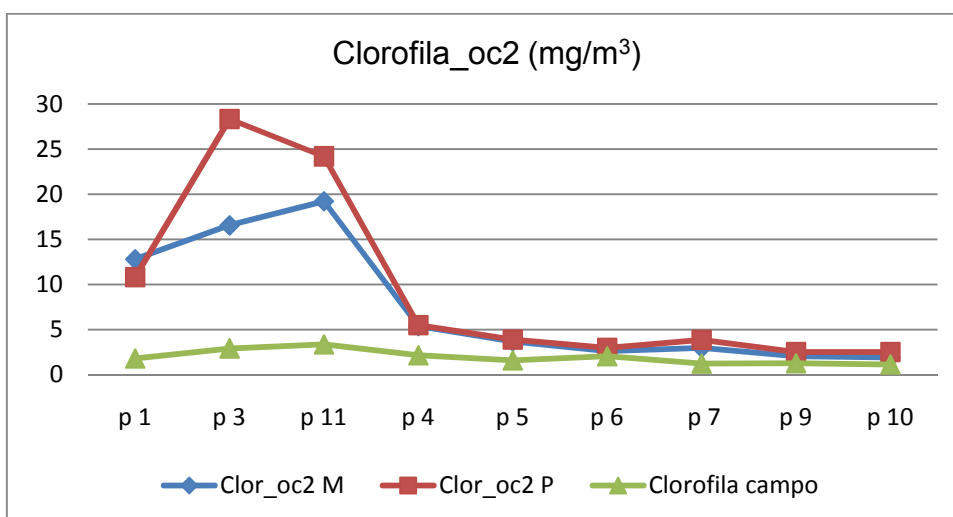
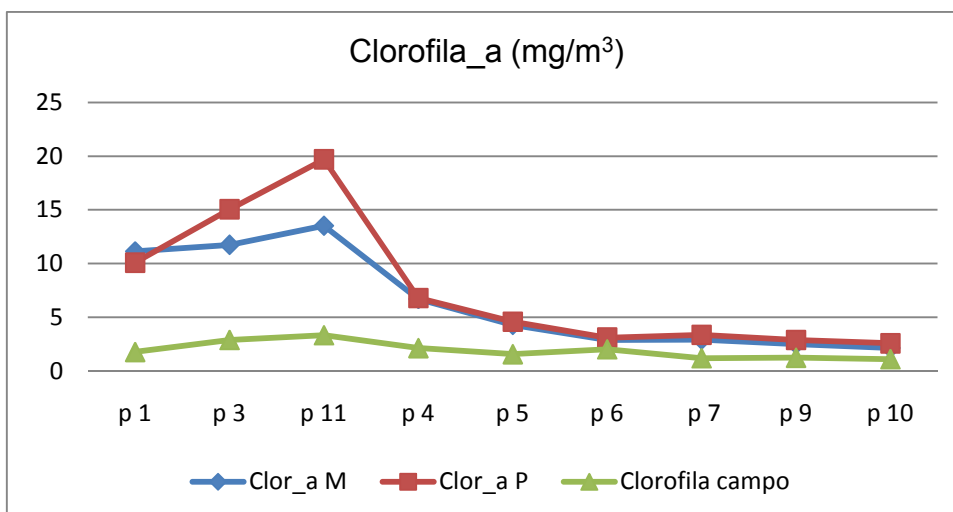


Figura 23: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_gsm e para a correção atmosférica de MUMM.

Para demonstrar as diferenças entre os valores em cada ponto de amostragem, foram produzidos gráficos utilizando os dois tipos distintos de correção atmosférica (Figura 24). Com isto foi possível determinar os pontos em que os valores apresentaram as maiores diferenças e identificar suas possíveis causas.



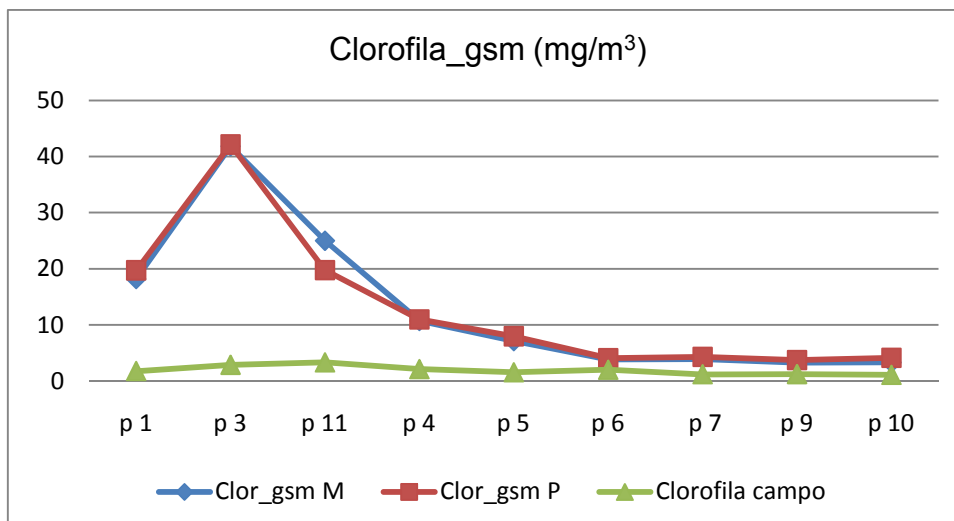


Figura 24: Variação da concentração de clorofila nos pontos amostrais entre os dados adquiridos *in situ* e pelos algoritmos, com duas correções atmosféricas distintas. M – corresponde a correção de MUMM; P – corresponde a correção Padrão.

O sensor MODIS captou as informações no mesmo período de maré vazante de quadratura ao qual ocorreram os levantamentos *in situ*, com intervalo de um dia entre as aquisições de dados. Para ambas as correções atmosféricas, todos os algoritmos superestimaram as concentrações de clorofila adquiridas em campo. A pior resposta foi encontrada no setor interno do estuário, com concentrações de clorofila muito distantes das reais, já para a porção externa, os valores gerados pelo sensor foram mais homogêneos e menos distantes dos encontrados em campo.

Analisando todos os pontos, os algoritmos apresentaram correlação linear significativa com as duas correções atmosféricas. Os valores de r foram levemente superiores para a correção atmosférica Padrão, mas o erro médio quadrático foi menor para a correção de MUMM. Observando os parâmetros analisados, os algoritmos Chlor_a e Chlor_oc3 com a correção atmosférica de MUMM são os que responderam de maneira mais precisa aos dados adquiridos *in situ*. Para ambas as correções, o algoritmo Chlor_gsm apresentou novamente as maiores concentrações de clorofila, tendo este o pior desempenho dentre todos.

3.2.3 Campanha do dia 06/07/2010

A campanha do dia 6 de julho teve seus dados comparados à imagem do dia 5 do mesmo mês.

A primeira comparação ocorreu com as imagens processadas com a correção atmosférica Padrão (Figura 25). Para o algoritmo Chlor_a, as concentrações de clorofila apresentaram demarcada distinção entre as regiões internas e externas do CEP, com valores máximos na porção interna, que chegaram a $48,4 \text{ mg/m}^3$ e mínimos na porção externa, que chegaram a $0,9 \text{ mg/m}^3$. O coeficiente de correlação foi de 0,732, e o erro médio quadrático de 0,777. Foi observada uma tendência moderada entre os dados (Figura 26), corroborada pelo valor de r , que demonstrou linearidade entre os valores. O elevado EMQ indicou uma distância entre as estimativas, com o sensor MODIS superestimando as concentrações de clorofila para todos os pontos amostrados.

O algoritmo Chlor_oc2 apresentou concentração máxima de clorofila superior ao anterior na porção interna, com valor máximo de $60,2 \text{ mg/m}^3$, enquanto que na região da plataforma rasa foram encontrados os valores mínimos, que chegaram a $0,9 \text{ mg/m}^3$. Essa grande variação nas concentrações refletiu no valor do coeficiente de correlação, que foi de 0,659 e o EMQ encontrado de 0,729. A baixa tendência observada (Figura 27) foi corroborada pelo valor de r , o qual indicou uma não linearidade entre as estimativas. O elevado EMQ comprova que o sensor MODIS superestimou os valores adquiridos *in situ*.

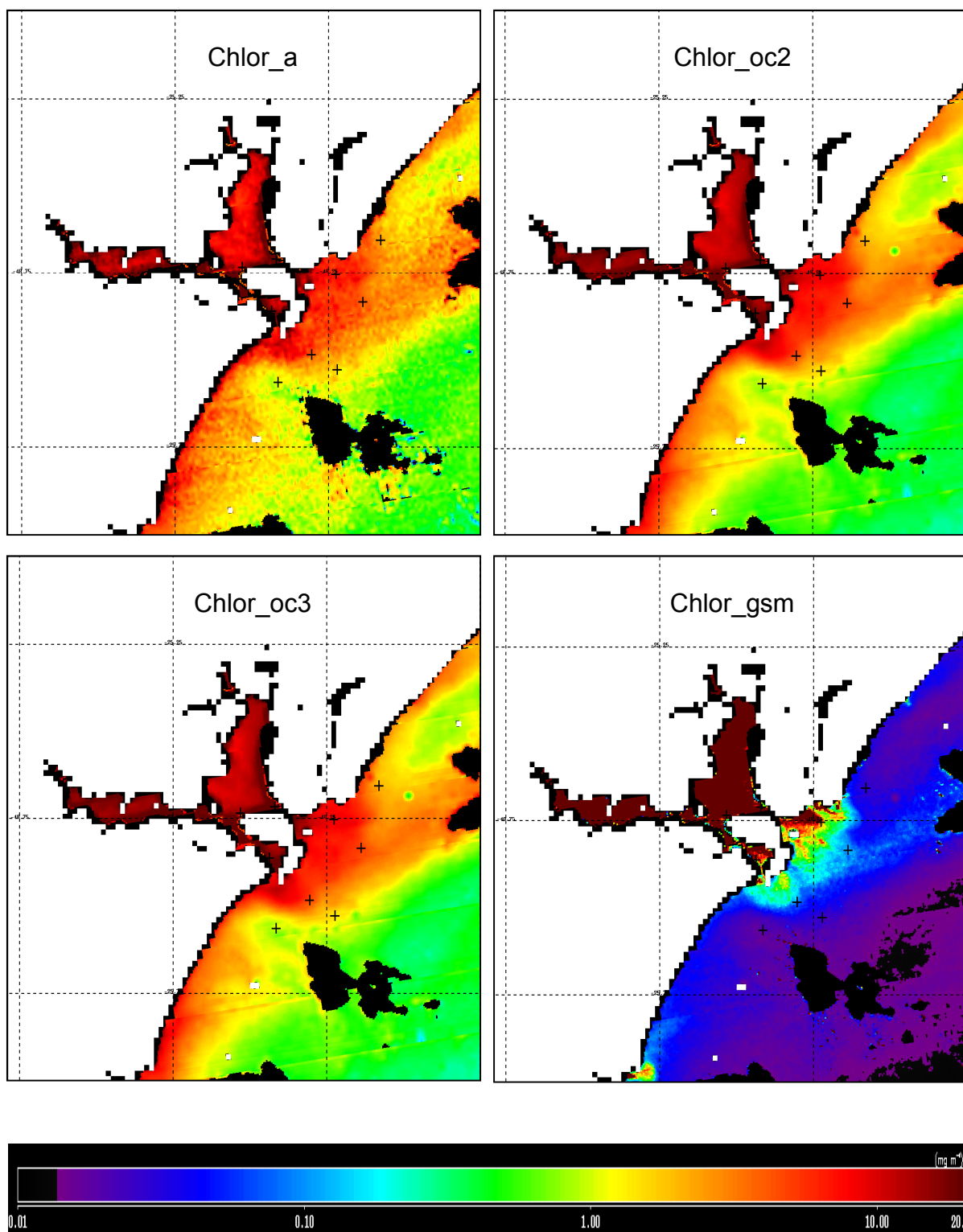


Figura 25: Imagens MODIS do dia 5 de julho correspondente aos algoritmos que estimam a concentração de clorofila a utilizando a correção atmosférica Padrão.

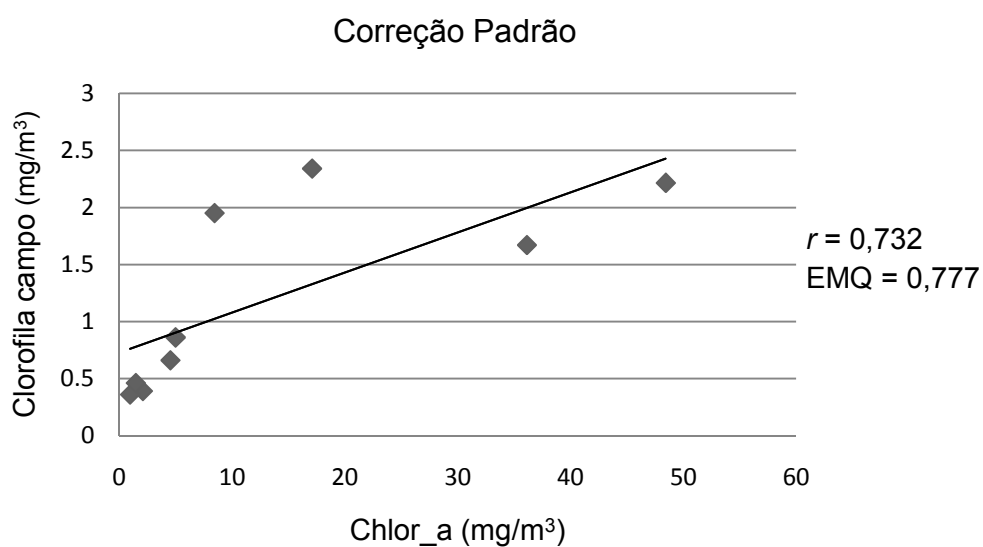


Figura 26: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_a e para a correção atmosférica Padrão.

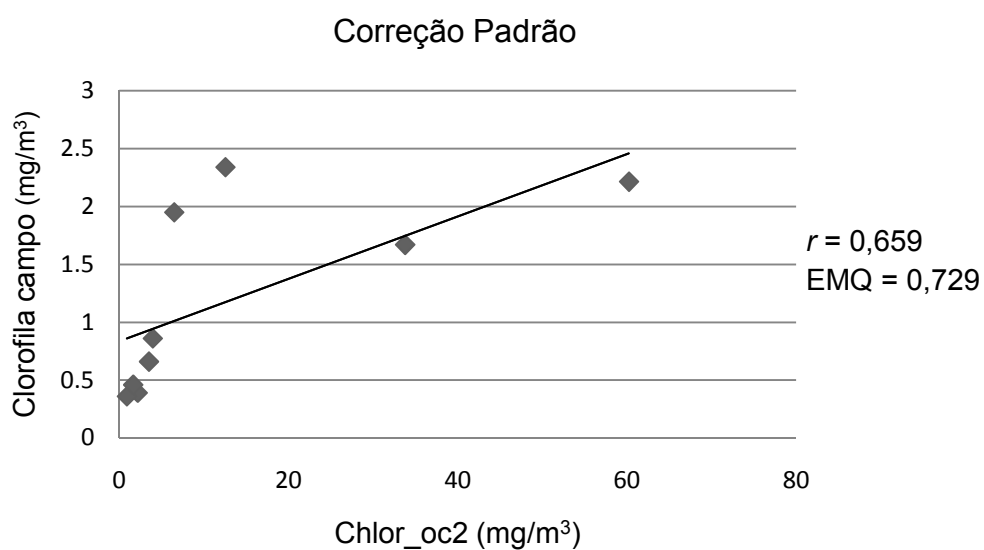


Figura 27: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc2 e para a correção atmosférica Padrão.

O algoritmo Chlor_oc3 apresentou estimativa semelhante a do Chlor_a, com pequenas variações em alguns pontos. A maior concentração de clorofila foi encontrada na região interna do estuário, com máximo de $49,6 \text{ mg/m}^3$, e na região externa o mínimo de $0,9 \text{ mg/m}^3$. O coeficiente de correlação foi de 0,730 e o EMQ encontrado de 0,783. Esses dados são semelhantes aos do algoritmo Chlor_a, no qual observou-se uma tendência moderada entre os dados (Figura 28), comprovada pelo valor de r , o qual demonstrou linearidade entre os valores. O elevado EMQ

indicou uma distância entre as estimativas, com o sensor MODIS superestimando as concentrações de clorofila para todos os pontos amostrados.

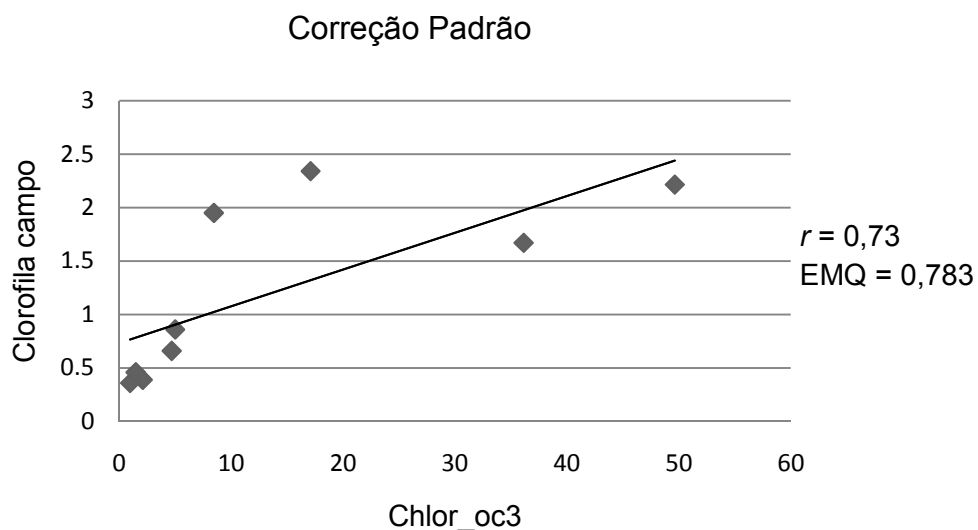


Figura 28: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc3 e para a correção atmosférica Padrão.

O algoritmo Chlor_gsm apresentou um padrão bem demarcado entre os setores interno e externo do CEP. A estimativa máxima de clorofila foi de 24,1 mg/m^3 , localizada na porção interna, e o valor mínimo de 1,7 mg/m^3 , na porção externa. O coeficiente de correlação foi de 0,981, sendo o mais alto dentre os algoritmos testados com a correção Padrão, e o EMQ de 0,756. Os dados apresentaram uma forte tendência (Figura 29), com linearidade, mas o elevado EMQ indicou a existência de uma distância entre os dados de campo e do satélite.

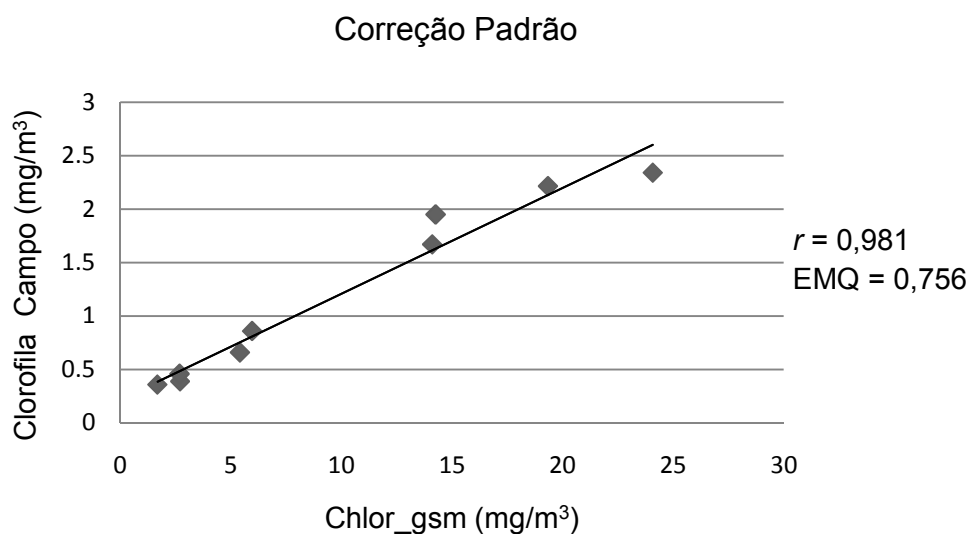


Figura 29: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_gsm e para a correção atmosférica Padrão.

Os valores de campo foram posteriormente comparados aos mesmos algoritmos com a correção atmosférica de MUMM (Figura 30).

O algoritmo Chlor_a apresentou valores homogêneos para todos os pontos de coleta, tendo variação na estimativa de clorofila de 5,1, na região interna, a 0,7 mg/m³, na porção externa. O valor do coeficiente de correlação foi de 0,945 e o EMQ de 0,134. O elevado valor de r indicou linearidade, retificando a forte tendência entre os dados observada na Figura 31. O EMQ demonstrou certa proximidade entre as estimativas do sensor MODIS com relação aos dados adquiridos *in situ*.

O algoritmo Chlor_oc2 apresentou valores ainda mais homogêneos do que o algoritmo anterior, com pouca variação entre os pontos. Os valores variaram entre 3,1 e 0,8 mg/m³, na porção interna e externa do estuário, respectivamente. O coeficiente de correlação foi de 0,951, e o EMQ de 0,07. Os dados apresentaram uma forte tendência (Figura 32), corroborada pelo elevado valor de r . Além disso, o baixo EMQ encontrado demonstrou a semelhança entre os dados, com valores estimados pelo sensor muito próximos aos adquiridos *in situ*.

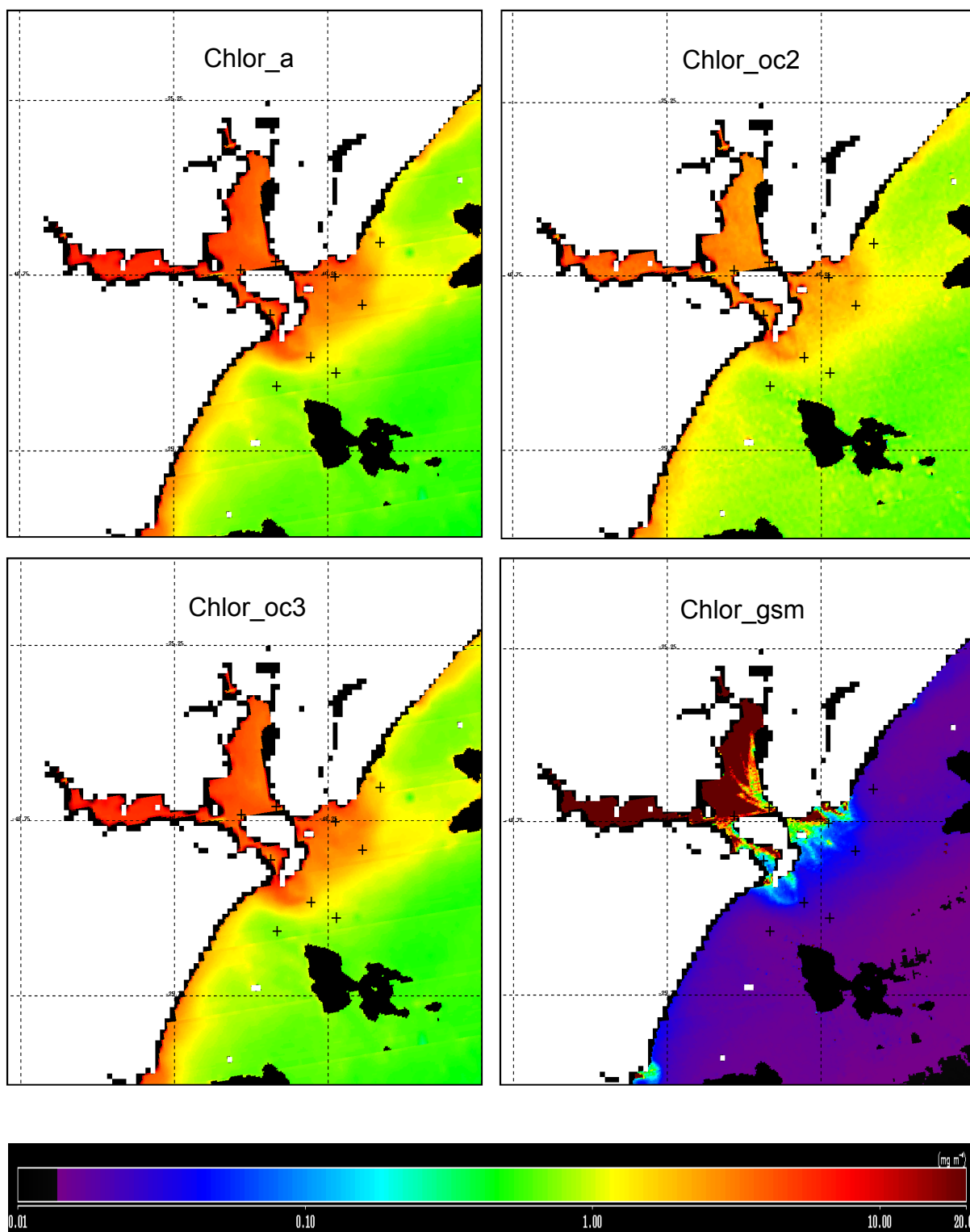


Figura 30: Imagens MODIS do dia 5 de julho correspondente aos algoritmos que estimam a concentração de clorofila a utilizando a correção atmosférica de MUMM.

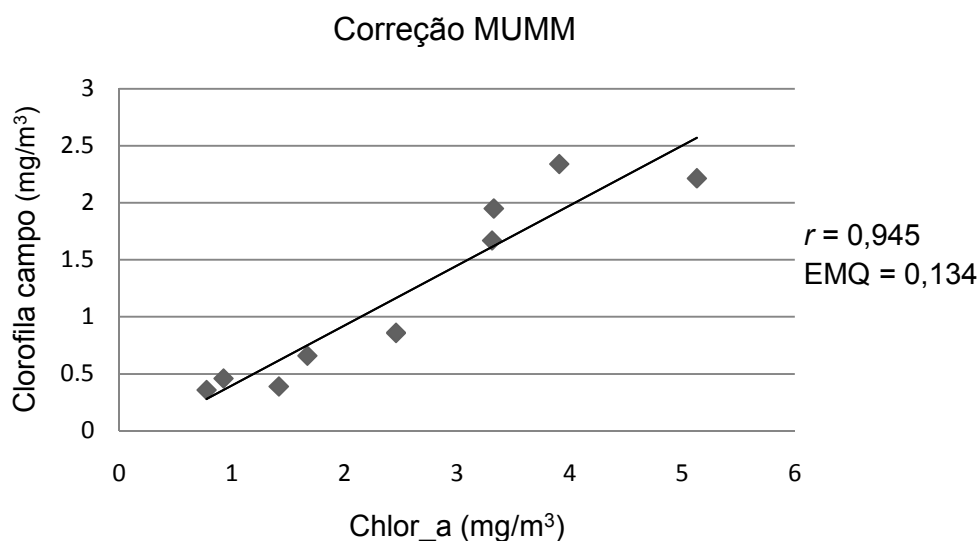


Figura 31: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_a e para a correção atmosférica de MUMM.

O algoritmo Chlor_oc3 apresentou as mesmas concentrações de clorofila encontradas pelo algoritmo Chlor_a e, conseqüentemente, valores idênticos do coeficiente de correlação (0,945) e do erro médio quadrático (0,135). Os dados apresentaram uma forte tendência (Figura 33), com o valor de r indicando correlação linear. O EMQ demonstrou certa proximidade entre os dados, com o sensor MODIS estimando concentrações de clorofila próximas as encontradas em campo.

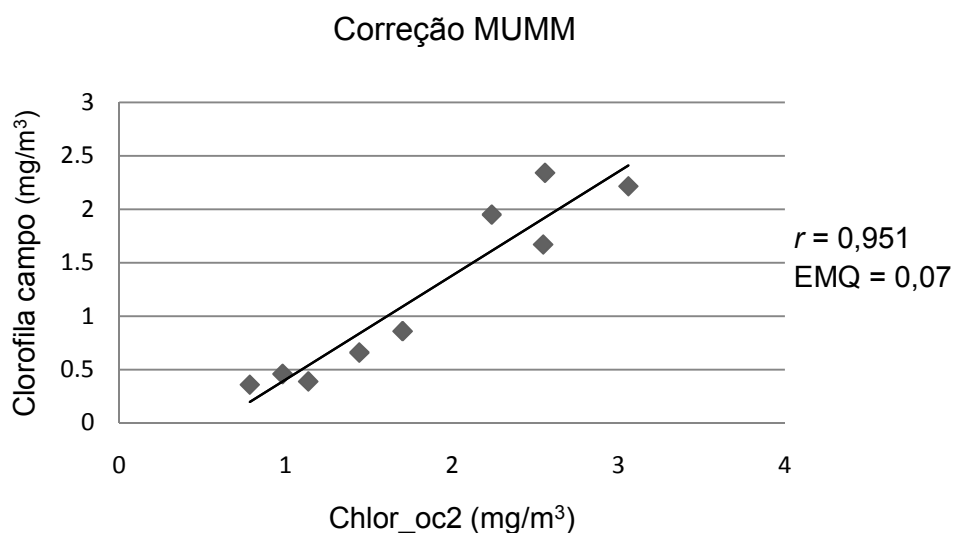


Figura 32: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc2 e para a correção atmosférica de MUMM.

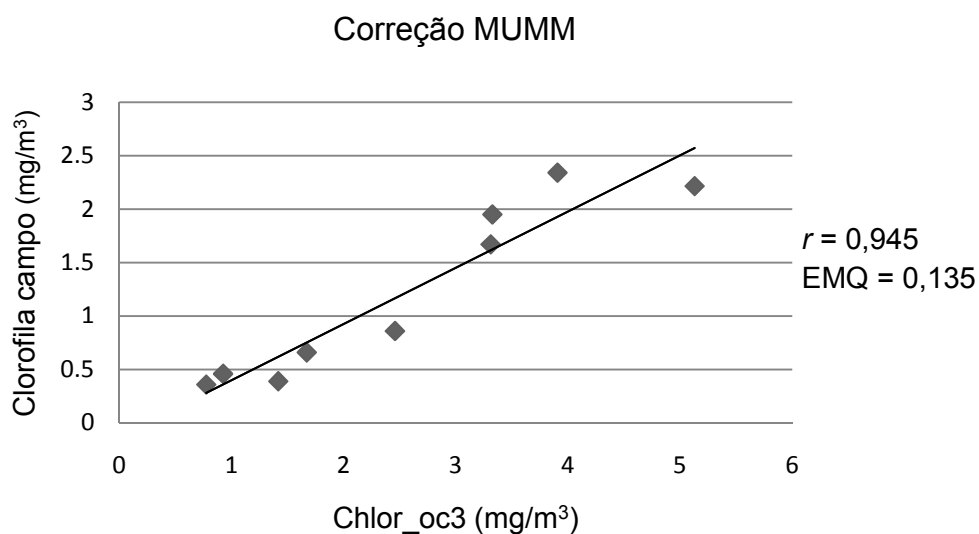


Figura 33: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_oc3 e para a correção atmosférica de MUMM.

O algoritmo Chlor_gsm apresentou as maiores concentrações de clorofila, com valor máximo de $16,8 \text{ mg/m}^3$ na região interna do CEP, e valor mínimo de $1,6 \text{ mg/m}^3$ na região da plataforma rasa. O valor do r foi de $0,928$ e o EMQ de $0,414$. Os dados apresentaram uma forte tendência (Figura 35), com valor de r indicando linearidade, mas o EMQ foi o mais alto dos algoritmos processados com a correção atmosférica de MUMM, demonstrando uma elevada distância entre os valores estimados pelo sensor MODIS e os dados adquiridos *in situ*.

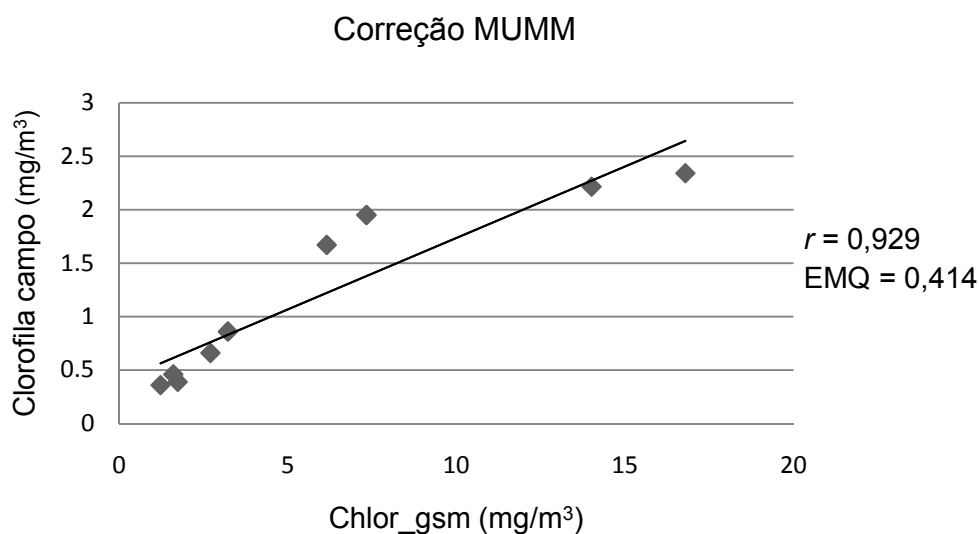
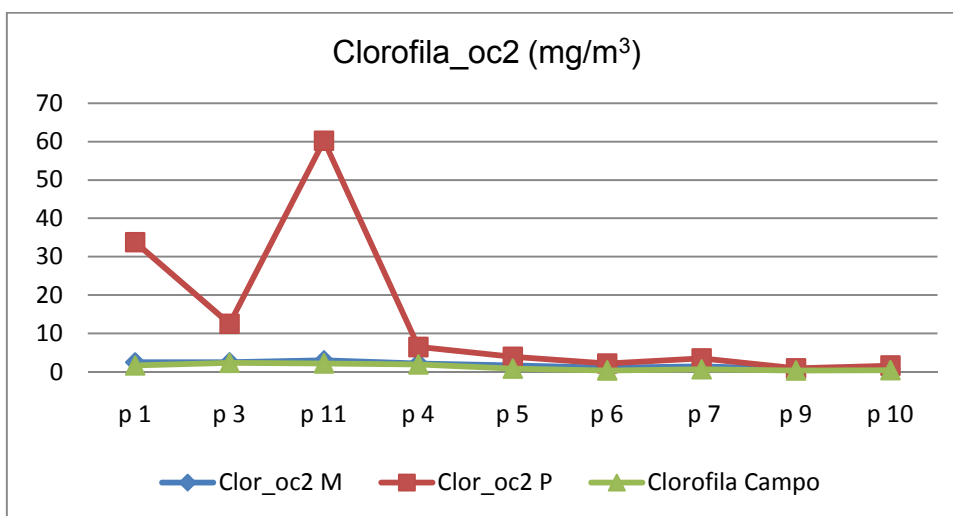
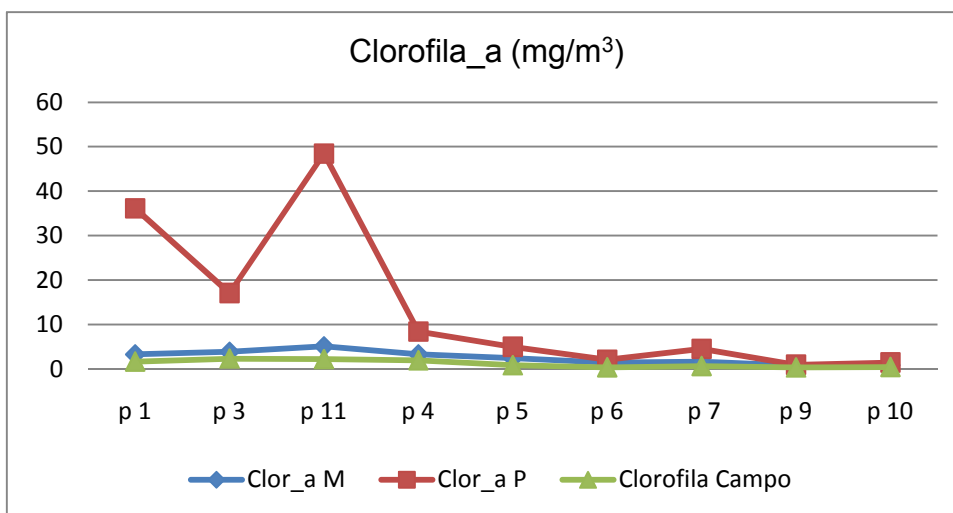


Figura 35: Dispersão dos valores de clorofila dos dados de campo e do algoritmo Chlor_gsm e para a correção atmosférica de MUMM.

Para demonstrar as diferenças entre os valores em cada ponto de amostragem, foram produzidos gráficos utilizando os dois tipos distintos de correção atmosférica (Figura 36). Com isto, foi possível determinar os pontos em que os valores apresentaram as maiores diferenças e identificar suas possíveis causas.



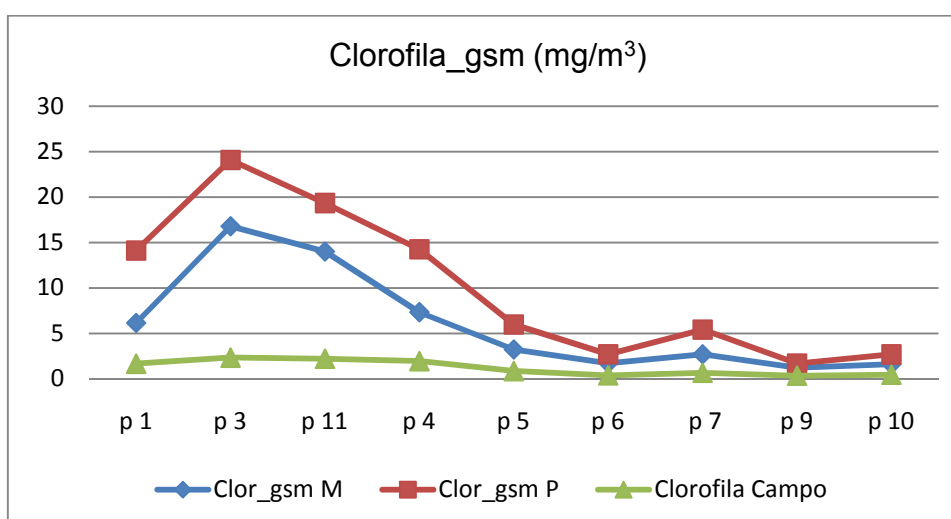
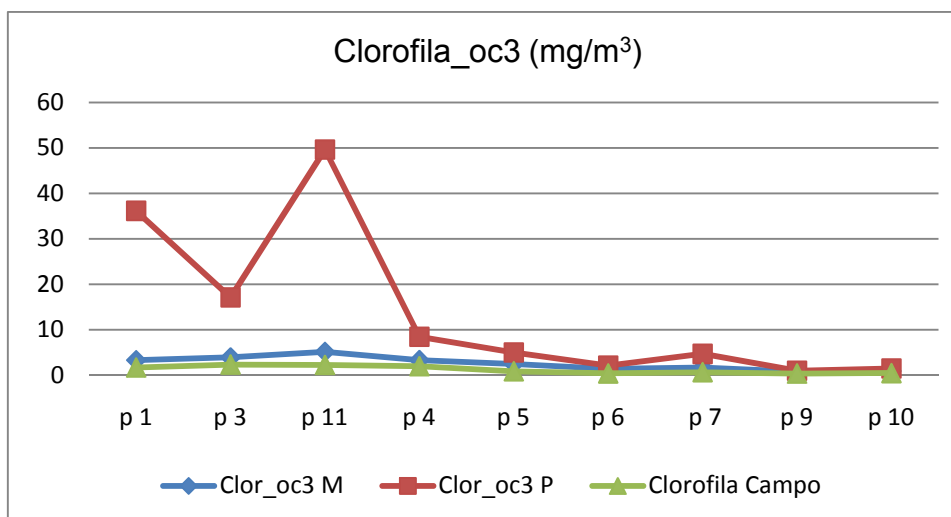


Figura 36: Variação da concentração de clorofila nos pontos amostrais entre os dados *in situ* e dos algoritmos com duas correções atmosféricas distintas. M – corresponde a correção de MUMM; P – corresponde a correção Padrão.

Para esta data, o sensor MODIS captou as informações no mesmo período de maré vazante de quadratura ao qual ocorreram os levantamentos *in situ*, com intervalo de um dia entre as aquisições de dados. Os algoritmos responderam de maneira distinta às duas correções atmosféricas, com os produtos processados com a correção atmosférica Padrão superestimando as concentrações de clorofila adquiridas em campo, principalmente nos pontos pertencentes ao setor interno do CEP. O algoritmo Chlor_oc2 teve o pior desempenho para esta correção, pois apresentou as estimativas de clorofila mais distantes dos valores reais.

Os valores de r foram superiores para a correção atmosférica de MUMM, e o erro médio quadrático foi menor para esta mesma correção. Observando tais

parâmetros, o algoritmo Chlor_oc2, processado com este modelo de correção atmosférica, foi novamente o que respondeu de maneira mais precisa aos dados adquiridos *in situ*.

O algoritmo Chlor_gsm apresentou novamente, para ambas as correções atmosféricas, o pior desempenho, superestimando consideravelmente as concentrações de clorofila, para todos os pontos de amostragem.

De maneira geral, a instabilidade do modelo de correção atmosférica Padrão, sobre as zonas costeiras, foi demonstrada por RUDDICK, *et al.* (2000), WANG & SHI (2005) e MOSES (2009), os quais identificaram reflectância significativa na região do infravermelho próximo, resultando na super estimativa da contribuição dos aerossóis e uma subestimação da radiação emergente da água. Tal modelo não se mostrou eficaz sobre a região do Complexo Estuarino de Paranaguá e plataforma rasa adjacente, superestimando as concentrações de clorofila em todas as imagens analisadas.

Verificada as incertezas da aplicação do modelo atmosférico global, RUDDICK *et al.* (2000), em estudo realizado sobre zonas costeiras, aplicaram o modelo matemático de MUMM sobre o algoritmo de correção atmosférica Padrão. Com isso, determinaram outra razão de reflectância na região do infravermelho próximo, e assim, desenvolveram o modelo de correção atmosférica de MUMM. Este modelo matemático interpreta os aerossóis de maneira heterogênea, obtendo resposta eficaz para sobre regiões estuarinas e costeiras.

Mesmo sendo desenvolvido para evitar reflectâncias negativas nos comprimentos de onda curta (RUDDICK, *et al.* 2006), o modelo de correção de MUMM ainda superestimou alguns dos valores de clorofila encontrados em campo, principalmente no setor interno do CEP. Esta inconsistência também foi comprovada por MOSES *et al.*, (2009) em estudo nas regiões costeiras russas.

Ao comparar os algoritmos globais de diversos sensores que estimam a concentração de clorofila, processados com as correções atmosféricas Padrão e de MUMM, a dados de campo, CARVALHO (2009) encontrou um desempenho satisfatório do algoritmo global do sensor MODIS, processado com o modelo de correção atmosférica de MUMM. Para estes algoritmos, a autora calculou o coeficiente de correlação, o qual indicou linearidade e erro médio quadrático baixos, demonstrando proximidade entre os valores estimados pelo MODIS aos dados de campo.

Da mesma maneira que as correções atmosféricas, o algoritmo global para estimativa de clorofila do sensor MODIS - OC3M tem sido refinado ao longo dos anos, através da comparação com demais algoritmos globais e regionais. Em estudo sobre a absorção dos constituintes ópticos, GARVER & SIEGEL (1997), desenvolveram o algoritmo GSM, que também estima dados de clorofila, posteriormente refinado por MARITORENA *et al.* (2002).

Comparando os dois modelos que estimam o valor de clorofila, o algoritmo GSM apresentou o pior desempenho, superestimando os valores e apresentando as maiores discrepâncias no setor interno do CEP. Essa resposta negativa deste algoritmo já era esperada, visto que o mesmo foi desenvolvido para cobrir regiões *offshore*, apresentando baixo desempenho quando comparado a dados de campo em estudos sobre regiões estuarinas (IOCCG, 2006). O algoritmo OC3M, composto pela variação nas razões de reflectância, que implicam em três novos algoritmos: Chlor_a, Chlor_oc2 e Chlor_oc3, obteve melhor desempenho quando comparado aos dados de campo.

Em estudo realizado no Estreito da Geórgia, KOMICK (2005) comparou os algoritmos OC3M e GSM aos dados de campo, com as mesmas correções atmosféricas aqui abordadas, e o melhor desempenho estatisticamente comprovado correspondeu ao algoritmo global do MODIS com a correção atmosférica de MUMM. Este autor afirmou ainda ser possível o acompanhamento da variabilidade das concentrações de clorofila, quando utilizado este algoritmo e esta correção atmosférica.

Dentre as variações do algoritmo OC3M do sensor MODIS, os produtos apresentaram respostas variáveis, com os algoritmos Chlor_a e Chlor_oc3 apresentando concentrações muito semelhantes. Estes resultados eram esperados visto que não existem diferenças nas equações base desses produtos, apenas os pressupostos são levemente distintos (O'REELY, *et al.* 1998). O produto mais consistente entre todos foi o Chlor_oc2. Diferente das outras duas variações do algoritmo OC3M, que utilizam a razão máxima entre os maiores valores de reflectância, medidos nos comprimentos de onda de 443 e 490 nm, o algoritmo Chlor_oc2 utiliza a razão entre as bandas de reflectância de sensoriamento remoto – (R_{469}/R_{555}), não descartando assim valores mínimos encontrados. Possivelmente isso interfere diretamente na super estimativa dos valores dos algoritmos Chlor_a e Chlor_oc3.

3.3 ACOMPANHAMENTO DA VARIABILIDADE DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA UTILIZANDO O SENSOR MODIS

Para o acompanhamento anual da concentração de clorofila, foi utilizado o produto que apresentou a melhor resposta às comparações com os dados adquiridos *in situ*. O algoritmo Chlor_oc2 apresentou os valores mais próximos aos reais nas análises, e estes foram processados com a correção atmosférica de MUMM, considerado o melhor modelo de correção para as imagens sobre a área de estudo.

Ao todo foram processadas e tratadas 28 imagens entre junho de 2009 e julho de 2010. As concentrações de clorofila foram relativamente homogêneas ao longo do ano (Figura 37), apresentando valores maiores na porção interna do CEP (p1, p3, p4 e p11), e menores na região da plataforma rasa. Para a maioria das datas os valores de clorofila ficaram abaixo de 5 mg/m^3 , com exceção para os dias 13 de julho, 08 e 15 de agosto de 2009 e para os dias 13 de março, 16 de abril, 2 de maio e 7 de junho de 2010, quando as concentrações de clorofila na porção interna chegaram a valores próximos a 20 mg/m^3 .

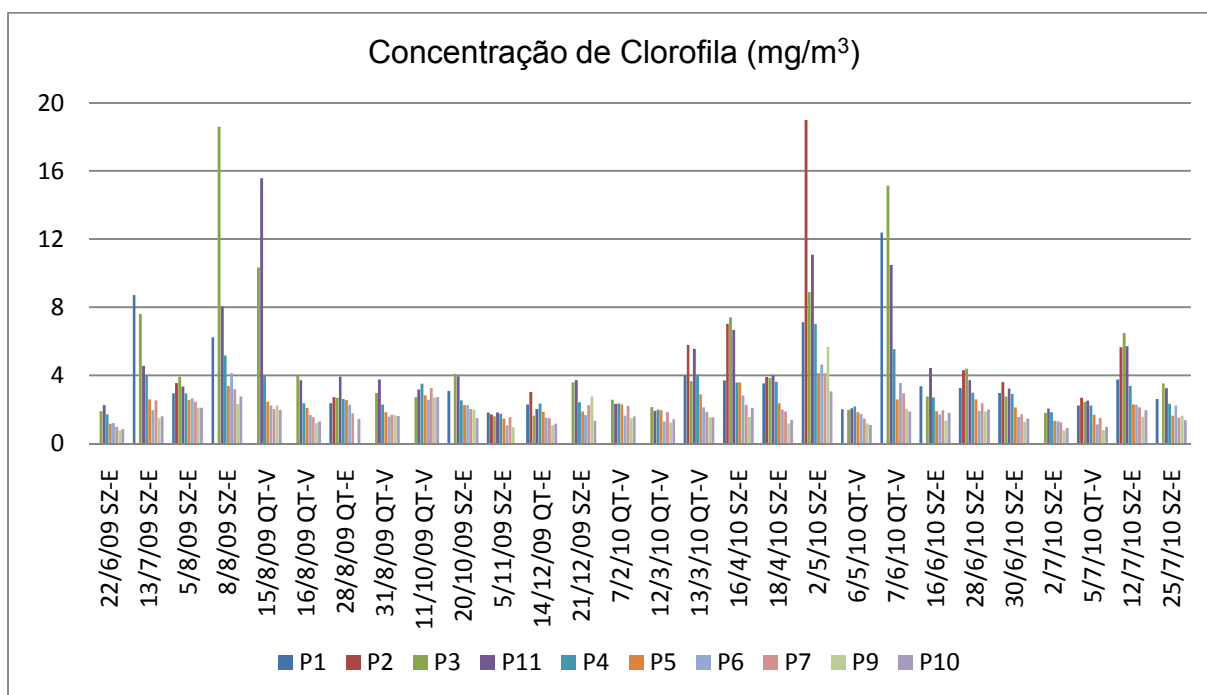


Figura 37: Concentração de clorofila para cada ponto das imagens processadas, contendo as datas das imagens, maré (SZ – Sizígia; QT – Quadratura) e período (E – Enchente; V – Vazante)

As médias das concentrações de clorofila para os setores interno e externo do CEP foram analisadas com relação à precipitação diária (Figura 38), e também com a precipitação dos dias antecedentes à aquisição das imagens (Tabela 2). Pela média da concentração de clorofila, encontrou-se o padrão já observado de valores mais elevados na porção interna do estuário, sendo que as maiores médias corresponderam às imagens que apresentaram os maiores valores de clorofila.

Entre os meses de junho a dezembro de 2009, verificaram-se baixas taxas de precipitação, e conseqüentemente menores concentrações de clorofila, enquanto que para os meses de janeiro a junho de 2010, as taxas de precipitação foram mais elevadas, e os valores de clorofila superiores.

Mesmo com as taxas de precipitação sendo adquiridas em um único ponto, na estação meteorológica de Pontal do Sul, ao correlacionar as concentrações de clorofila com a precipitação diária, foi possível observar uma relação entre estas variáveis para o setor interno do CEP. Devido à grande área que compreende a bacia hidrográfica do CEP, provavelmente esta correlação seria mais representativa se fossem adquiridas as taxas de precipitação sobre demais pontos da região.

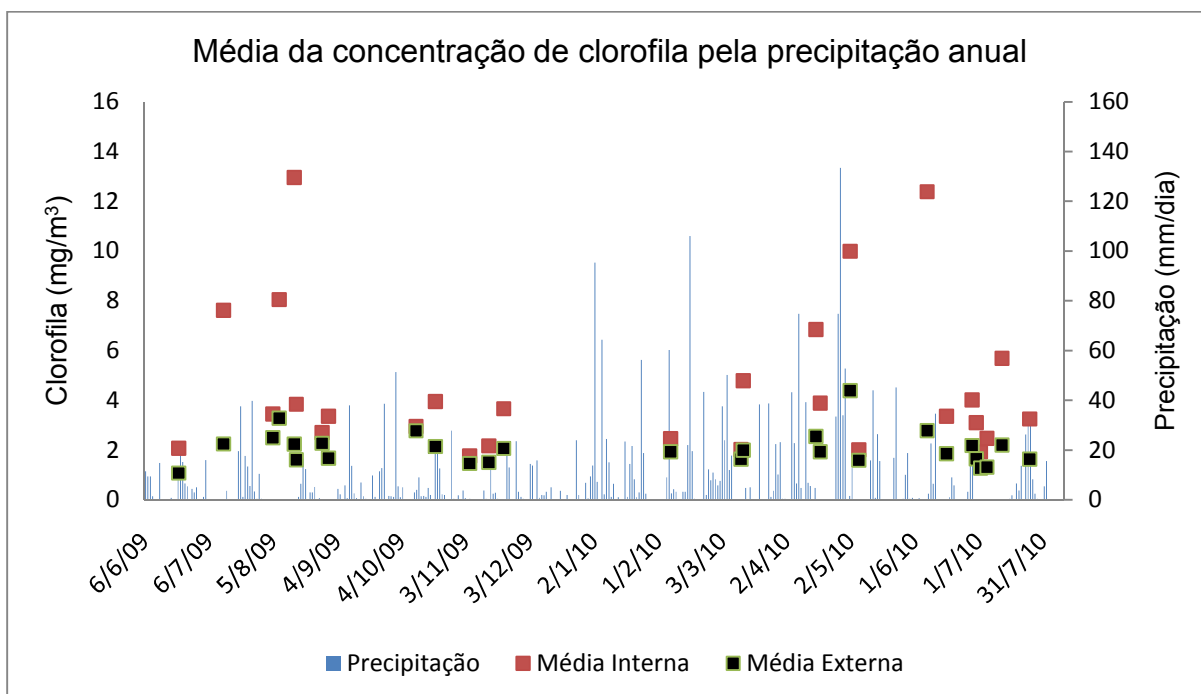


Figura 38: Média da concentração de clorofila, extraída a partir das imagens do sensor MODIS, para a região interna e externa do CEP sobre a precipitação total diária.

Tabela 2: Dados da precipitação acumulada para os dias que antecederam a aquisição das imagens.

Data	Precipitação - mm/dia					Concentração de Clorofila mg/m ³	
	Dia anterior	2 dias antes	3 dias antes	5 dias antes	7 dias antes	Média Interna	Média Externa
22/6/09	0,8	0,8	0,8	0,8	15,6	2,07	1,07
13/7/09	0,2	0,4	0,6	16,6	18	7,62	2,25
5/8/09	0	0,2	0,4	11,2	15	3,45	2,50
8/8/09	0	0	0	0,2	0,8	8,05	3,29
15/8/09	0	0,2	0,2	0,2	0,2	12,96	2,24
16/8/09	0	0	0,2	0,2	0,2	3,84	1,61
28/8/09	0	0,6	0,6	8,8	11,8	2,70	2,27
31/8/09	0	0	0	0,6	5,8	3,36	1,67
11/10/09	1,6	3	12	19	19,2	2,95	2,78
20/10/09	2	4,2	16,8	56,4	58,4	3,95	2,15
5/11/09	0	0	0	0	0,4	1,77	1,46
14/11/09	0,2	0	0,6	5,8	20,8	2,17	1,51
21/11/09	3,2	26,8	26,8	39,8	63	3,66	2,07
7/2/10	0	0	0	0	0	2,46	1,93
12/3/10	0	0	0,2	30	104,2	2,03	1,64
13/3/10	0	0	0	18	80,2	4,79	2,00
16/4/10	0,2	0,4	5,2	10,8	56,8	6,85	2,55
18/4/10	0	0	0,2	5,2	10,8	3,88	1,93
2/5/10	0	0	12,8	14,6	101,4	9,99	4,39
6/5/10	0	0	0,2	0,2	13	2,01	1,59
7/6/10	0	0,2	34,8	63,8	66,2	12,39	2,78
16/6/10	0	5,8	14,8	15,8	15,8	3,36	1,85
28/6/10	0	0	0	0	34,8	4,02	2,18
30/6/10	0	0,2	0,2	0,2	0,2	3,10	1,65
2/7/10	0	0	0	0,2	0,2	1,93	1,28
5/7/10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	2,48	1,32
12/7/10	6,6	6,8	8,6	9,2	9,4	5,69	2,20
25/7/10	15,6	21	21	21,4	32	3,25	1,64

Em estudo sobre a variação sazonal e espacial de nutrientes e clorofila *a* na Baía de Paranaguá, BRANDINI, *et al.* (1988) encontraram concentrações de clorofila que variaram entre 0,7 e 24,6 mg/m³, com valores mínimos na porção próxima a desembocadura e máximos nas regiões internas da baía. Os autores observaram a

relação direta entre as taxas de precipitação e o aumento das concentrações de clorofila nas áreas internas do estuário.

Através da moderada tendência observada entre as concentrações de clorofila para as médias interna e externa (Figura 39), e pelo valor do coeficiente de correlação de 0,667 é possível inferir que existem diferenças entre as variáveis atuantes nos diferentes setores abordados. Tal correlação também foi encontrada em um estudo a respeito da variação temporal de parâmetros físico-químicos, na mesma área de estudo, por REBELLO *et al.* (1990). Através da variação da concentração de clorofila ao longo do ano, foi possível sugerir que a dinâmica sazonal, de tal variável, na coluna d'água difere entre os setores estudados, sendo que o interno está relacionado predominantemente ao regime de chuvas, enquanto que o externo sofre maior influência das alterações sazonais da circulação sobre a plataforma adjacente (REBELLO *et al.* 1990).

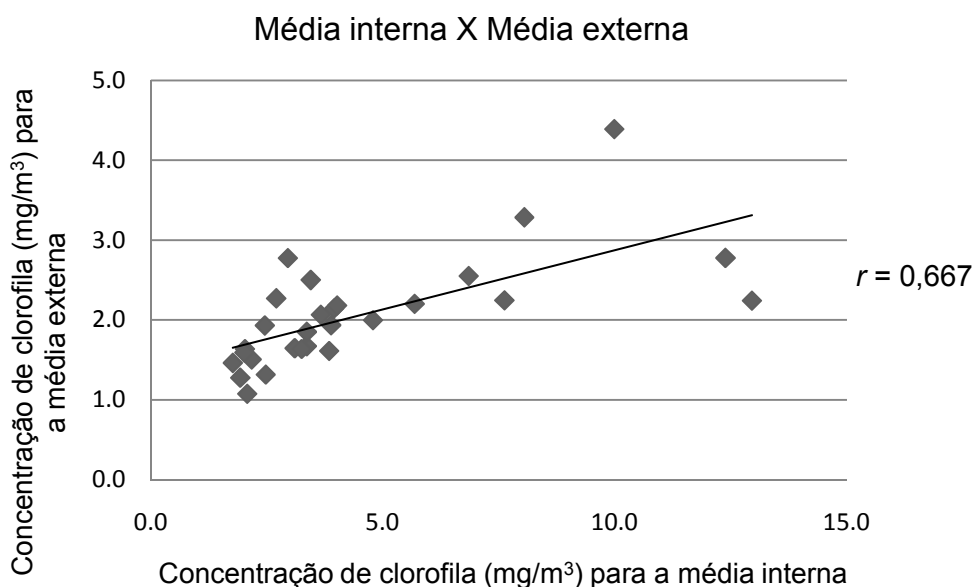


Figura 39: Dispersão das concentrações médias de clorofila das porções internas e externas do CEP para os dados das imagens do sensor MODIS.

Em estudo sobre a dinâmica espaço-temporal de nutrientes e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá, MACHADO *et al.* (1997) analisaram a influência do aporte pluvial e interferência da plataforma rasa sobre as concentrações de clorofila, assim como NOERNBERG (2001), que verificou as variações da mesma variável entre os eixos Leste – Oeste (L-O) e Norte – Sul (N-S).

Ambos os autores relacionaram as taxas de precipitação, de diversos pontos da bacia hidrográfica do CEP, e o aporte fluvial com as concentrações de clorofila, encontrando relação direta entre as variáveis para o setor interno do estuário. Para a porção externa, verificaram ainda a influência dos processos de circulação da plataforma rasa sobre os valores de clorofila.

As concentrações de clorofila estimadas pelo algoritmo Chlor_oc2, processado com a correção atmosférica de MUMM coincidem, de maneira geral, aos valores pretéritos adquiridos *in situ*. Embora apresentem algumas estimativas destoantes, que talvez pudessem ser explicadas pela análise de outras variáveis ou por taxas de precipitação de outras localidades, o uso do sensor MODIS se mostrou um mecanismo eficaz para o acompanhamento anual da concentração de clorofila no Complexo Estuarino de Paranaguá e plataforma adjacente.

4 CONCLUSÃO

Os fatores que limitam o uso das imagens de satélite demonstraram forte interferência na qualidade da informação gerada pelo sensor MODIS, para zonas costeiras e estuarinas. As questões referentes ao *sun glint* e a posição da área de estudo no *swath* seguem padrões previsíveis para as imagens geradas, enquanto que os fatores meteorológicos, como a cobertura de nuvens, por muitas vezes não podem ser previstos e acabam inviabilizando o uso das imagens. Sendo assim, mesmo com um planejamento adequado, torna-se difícil um sincronismo perfeito entre as campanhas de campo e a passagem do satélite.

Mesmo apresentando algumas das inviabilidades citadas, os dados gerados pelo MODIS são valiosos se considerada a grande área observada, o número de produtos finais que podem ser gerados, a disponibilidade de dados pretéritos e a facilidade na amostragem, com menos esforços e baixos custos quando comparados as coletas de campo.

Os dados obtidos pelo sensor MODIS podem não responder de maneira adequada às regiões estuarinas e costeiras. Os resultados evidenciaram que os diferentes produtos e as distintas correções atmosféricas, em sua maioria, superestimam os valores para o setor interno do estuário, enquanto que para a plataforma adjacente ao CEP esses valores são mais próximos dos medidos *in situ*. No entanto, a escolha adequada de algoritmos e correções atmosféricas pode gerar resultados satisfatórios

O algoritmo Chlor_oc2 e o modelo de correção atmosférica de MUMM apresentaram bom desempenho quando comparados aos dados de campo, e também uma boa resposta ao acompanhamento anual das variabilidades da concentração de clorofila. Demais estudos envolvendo outros produtos disponíveis pelo sensor devem ser efetuados comparando-os com dados adquiridos *in situ*, afim de estabelecer os melhores algoritmos para estimativas das variáveis atuantes na área de estudo. Posteriormente, poderá ser realizado um refinamento dos melhores algoritmos, ou até mesmo a criação de um modelo próprio para a região. Mas tal resultado só será possível com a continuidade de pesquisas que utilizem imagens de satélite e dados *in situ* sobre a região abordada.

Por fim, deve-se considerar a importância e disponibilidade desse método de aquisição de dados, que após validados e calibrados, nos fornecerão informações oceanográficas únicas sobre o CEP e a porção da plataforma rasa adjacente.

REFERÊNCIAS

- ANGELOTTI, R. **Variabilidade da pluma e da estratificação termo-halina na desembocadura do complexo estuarino de Paranaguá e plataforma adjacente.** 152 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos) – Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paraná, 2008.
- ANGULO, R. J. **Geologia da planície costeira do Estado do Paraná.** 334 f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- BAILEY, S. W.; WERDELL, P. J. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products. **Remote Sensing of Environment, USA**, v. 102, p. 12-23, 2006.
- BARNES, W, L.; XIONG, X.; SALOMONSON, V, V. Status of Terra MODIS and Aqua MODIS. **Advanced Space Research**, Oxford, v. 32, p. 2099-2106, 2003.
- BRANDINI, F. P.; THAM, C. A.; VENTURA, I. Ecological studies in the Bay of Paranaguá. III. Seasonal and spatial variation of nutrients and chlorophyll-a. **Nerítica**, v. n. 1, p. 1-30, 1988.
- CARVALHO, M. **Estimativa da concentração de clorofila-a através de dados de cor do oceano e caracterização oceanográfica da plataforma continental adjacente à Baizada Santista.** 195 f. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- CASTRO, B. M.; VANIN, A. M. S. P.; BRANDINI, F.; MIRANDA, L. B. Multidisciplinary oceanographic processes on the Western Atlantic continental shelf Between 4°S and 34°S (4,W). New York, In: ROBINSON, A. R.; BRINK, K. H. (Ed.). **The sea**. New York: John Wiley & Sons, v. 14, p. 259-293, 2005.
- CHANG, G. C.; GOULD, R. W. Comparisons of optical properties of the coastal ocean derived from satellite ocean color and *in situ* measurements. **Optics Express**, v. 14, n. 22, 15 p, 2006.
- DARECKI, M.; STRAMSKI, D. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 89, p. 326-350, 2004.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Previsões de marés**. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/index.htm>. Acesso em: 20/10/2010.

FELDMAN, G. C.; MCCLAIN, C.R. Ocean Color Forum. Eds. KURING, N.; BAILEY, S. W.; THOMAS, D.; FRANZ, B. F.; MEISTER, G.; WERDELL, P. J.; EPLEE, R. E.; MACDONALD, M.; RUBENS, M. **NASA Goddard Space Flight Center**. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 13/06/2010.

FREITAS, F. H.; NOERNBERG, M. A. Análise dos fatores limitantes da resolução temporal do sensor Aqua-Modis em estudos de águas costeiras: um exemplo do sul do Brasil. In: Congresso Latino-Americano De Ciências Do Mar, 22. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: [s.n.], p. 385, 2004.

GITELSON, A. A.; DALL'OLMO, G.; MOSES, W.; RUNDQUIST, D. C.; BARROW, T.; FISHER, T. R.; GURLIN, D.; HOLS, J. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. **Remote Sensing of Environment**, 112, p. 3582-3593, 2008.

GFSC / DAAC / NASA. **MODIS-Terra Product Descriptions**. Disponível em: http://daac.gsfc.nasa.gov/MODIS/Terra/product_descriptions_Modis.shtml, Acesso em: 10/05/2010.

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. Paraná – Mar e Costa. Subsídios ao Ordenamento das Áreas Estuarina e Costeira do Paraná. Projeto Gestão Integrada da Zona Costeira do Paraná com ênfase na Área Marinha, **Programa Nacional de Meio Ambiente – PNMA II**, Organizadores, Rosana M. B. Castella, Paulo R. Castella, Débora C. S. Figueiredo, Sandra M. P. Queiroz. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA. Curitiba, 2006.

GORDON, H. R.; WANG, M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the ocean with SeaWiFS: a preliminary algorithm. **Applied Optics**, v. 33, n. 3, 443-452, 1994.

GORDON, H. R.; BROWN, O. B.; EVANS, R H.; BROWN, J. W.; SMITH, R. C.; BAKER, K. S.; CLARK, D. K. A semianalytic radiance model of ocean color. **Journal Geophysical**, Res. 93: 10.909-10.924, 1988.

GORDON, H. R.; MOREL, A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery. In: Barber, R.T; Mooers, N.K.; Browman, M.J.; Zeitzschel (eds.). **A Review, Lecture notes on coastal and estuarine studies**, Springer-Verlag, New York, 114p, 1983.

IPARDES. **Diagnóstico físico ambiental da Serra do Mar - área sul**. Vol. 02. Curitiba, 1991.

INTERNATIONAL OCEAN-COLOUR COORDINATING GROUP - IOCCG. Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms and Applications. Lee, Z. P. (ed.), **Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group**, n. 5, Dartmouth, Canadá, 2006.

JOINT, I.; GROOM, S. B. Estimation of phytoplankton production from space: current status and future potential of satellite remote sensing. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, Amsterdam, v. 250, p. 233-255, 2000.

KAMPEL, M.; NOVO, E. M. L. M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: SOUZA, R. B. (Org.). **Oceanografia por satélites**. São Paulo: Oficina de textos, p.179-196, 2005.

KOMICK, N. M. **Remote sensing chlorophyll-a in the Strait of Georgia**. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Geografia, University of Victoria, USA, 2005.

KOMICK, N. M.; COSTA, M. P. F.; GOWER, J. Bio-optical algorithm evaluation for MODIS for western Canada coastal waters: An exploratory approach using in situ reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 113, p. 794-804, 2009.

LADNER, S.D.; SANDIDGE, J.C.; LYON, P.E.; ARNONE, R.A.; GOULD, R.W.; LEE, Z.P.; MARTINOLICH, P.M. Development of Finer Spatial Resolution Optical Properties from MODIS. In: SPIE **Optics and Photonics Meeting**, San Diego, California/USA, 2007.

LAMOUR, M. R. **Morfodinâmica sedimentar da desembocadura do complexo estuarino de Paranaguá – PR**. 177 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

LANA, P. C. Macrofauna bêntica de fundos sublitorais não consolidados da Baía de Paranaguá (Paraná). **Nerítica**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 79-89, 1986.

LANA, P. C.; MARONE, E.; LOPES, R. M.; MACHADO, E. C. The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: SEELIGER, U.; LACERDA, L. D.; KJERFVE, B. (Ed.). **Coastal Marine Ecosystems of Latin America**, Berlin: Springer-Verlag, 2000. p. 131-145, 2000.

MACHADO, E. C.; DANIEL, C. B.; BRANDINI, N.; QUEIROZ, R. L. V. Temporal and spatial dynamics of nutrients and particulate suspended matter in Paranaguá Bay, PR, Brazil. **Nerítica**, Pontal do Paraná, v. 11, p. 17-36, 1997.

MANTOVANELLI, A. **Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem**. Curitiba, 146 f. Dissertação de mestrado em Geologia Ambiental, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 1999.

MANTOVANELLI, A.; MARONE, E.; SILVA, E. T.; LAUTERT, L. F. C.; KLINGENFUSS, M. S.; PRATA JR, V. P.; NOERNBERG, M. A.; KNOPPERS, B. A.; ANGULO, R. J. Combined tidal velocity and duration asymmetries as a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay Estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 59, p. 523-537, 2004.

MARITORENA, S., SIEGEL, D.A., AND PETERSON, A.R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. **Applied Optics**, 41: 2705-2714, 2002.

MARONE, E.; CAMARGO, R. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: O evento de 18 de agosto de 1993. **Nerítica**, Curitiba, n. 8, p. 73-85, 1994.

MARONE, E.; JAMIYANAA, D. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the Estuarine Complex of the Bay of Paranaguá, Paraná, Brazil. **Nerítica**, Curitiba, n. 11, p. 95-107, 1997.

MÉLIN, F.; ZIBORDI, G.; BERTHON, J. F. Assessment of satellite ocean color products at a coastal site. **Remote Sensing of Environment**, 111: 192-215, 2007.

MENEZES, V. V. **Relação entre processos físicos e a cor do oceano Atlântico tropical**. 159 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations on ocean color. **Limnology and Oceanography**, n. 22, p. 709-722, 1977, 1977.

MOREL, A. Minimum requirements for an operational ocean-colour sensor for the open ocean. **IOCCG Reports**, Dartmouth, Nova Scotia, v. 1, 46 p, 1998.

MOSES, W. J.; GITELSON, A. A.; BERDNIKOV, S.; POVAZHNYI, V. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II Waters using MODIS and MERIS data – successes and challenges. **Environmental Research Letters**, 4: 8 p, 2009.

NASA. **Aqua Brochure**, 44 f., NP 1 -422. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 2002 A.

NOERNBERG, M. A. **Processos Morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá – Paraná - Brasil: um estudo a partir de dados *in situ* e Landsat-TM**. 142 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

NOEMBERG M., LAUTERT, L.F.C.; ARAUJO A.D.; MQRONE, E.; ANGELOTTI, R.; NETTO JR., J.P.B.; KRUG, L.A. Remote sensing and GIS integration for modelling the Paranaguá Estuarine Complex, Brazil. **Journal of Coastal Research**, 39: 1627-1631, 2006.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. Ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1992.

OLIVEIRA, E. N. **Impacto de barragens sobre a dispersão de matéria e a sustentabilidade da pluma costeira do rio São Francisco (SE/AL): análise espacial e temporal por sensoriamento remoto**. 158 f. Tese (Doutorado em Geoquímica Ambiental) – Setor de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.

O'REILLY, J. E., e 24 co-autores. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. **NASA Tech. Memo**. 2000-206892, Vlo. 11, S.B. Hooker and E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, 49 p, 2000.

O'REILLY, J. E.; MARITORENA, S.; MITCHELL, B.G.; SIEGEL, D.A.; CARDER, K.L.; GARVER, S.A.; KAHRU, M.; MCCLAIN, C. Ocean Color chlorophyll algorithm for SeaWiFS. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. C11, 24,937-24,953, 1998.

REBELLO, J.; BRANDINI, F. P. Variação Temporal de Parâmetros Hidrográficos e Material Particulado em Suspensão em Dois Pontos Fixos da Baía de Paranaguá, Paraná. **Nerítica**, Pontal do Paraná, v. 5, n. 1, p. 95-111, 1990.

ROBINSON, I. S. **Satellite oceanography: an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists**. Reino Unido: Ellis Horwood, 1985.

RUDDICK, K.G.; CAUWER, V.D.; PARK, Y.J.; MOORE, G. Seaborne measurements of near infrared water-laving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters. **Limnology and Oceanography**, v. 51 (2), p. 1167-1179, 2006.

RUDDICK, K.G.; OVIDIO, F.; RIJKEBOER, M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters. **Applied Optics**, v. 39, n. 6, 897-912, 2000.

SAVTCHENKO, A. *et al.* Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. **Advanced Space Research**, Oxford, v. 34, p. 710–714, 2004.

SCHALLES, J. F. Optical Remote Sensing Techniques to Estimate phytoplankton Chlorophyll a Concentrations in Coastal Waters with Varying Suspended Matter and CDOM Concentrations. **Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes: Science and Management Applications**, RICHARDSON L.L.; LEDREW, E. F. (Eds), Cap. 3, 2006.

SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Histórico e descrição. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Orgs). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Editora Parêntese, p. 1-23, 2007.

SOUZA, R. B. Sensoriamento Remoto dos Oceanos. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 6, n. 1, 24 p, 2003.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos Editora S.A. – LTC, 1998.

XIONG, X.; CHIANG, K.; SUN, J; BARNES, W, L.; GUENTHER, B; SALOMONSON, V, V. NASA EOS Terra and Aqua MODIS on-orbit performance. **Advanced Space Research**, Maryland, v. 43, p. 413-422, 2009.

WANG, M. H.; SHI, W. Estimation of ocean contribution at the MODIS near-infrared wavelengths along the east coast of the US: two case studies. **Geophysical Research**, Lett. 32 L13606, doi:13610.11029/12005GL022917 (2005), 2005.